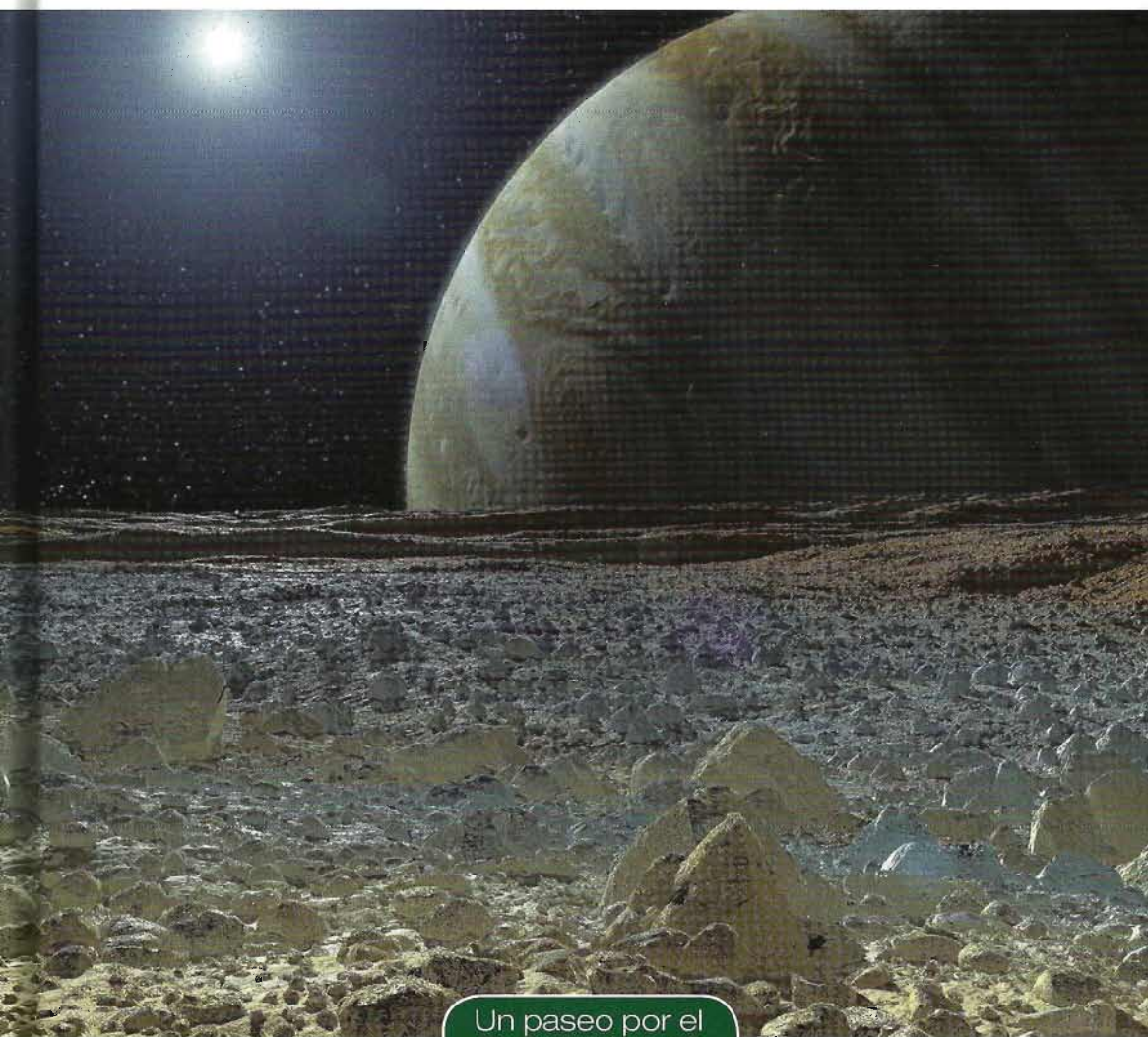


El sistema solar

Un rincón particular
de la Vía Láctea



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmureau.blogspot.com/>

El sistema solar

Un rincón particular
de la Vía Láctea

RBA

Imagen de cubierta: Recreación artística que ilustra una vista de Júpiter desde su satélite Europa.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Joel Gabàs Masip por el texto

© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.

© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan; Tenllado Studio: 40-41

Fotografías: Apollo 11/NASA: 151d; Archivo RBA: 29; ESA/Hubble, NASA, Karl Stapelfeldt (GSFC), B. Stecklum y A. Choudhary (Observatorio Estatal de Turingia, Alemania): 39; ESO: 65b, 145b; Galileo Project, JPL, Magellan Team, JPL, NASA: 69b; Larslantz/istockphoto: 129a; Mattias Malmer/NASA/JPL: 69a; NASA: 79a, 79b, 103b, 129b, 145a, 151i; NASA/GSFC/MIT/LOLA: 85a; NASA/JHU Applied Physics Lab/Instituto Carnegie, Washington: 65a; NASA/JPL: 113a; NASA/JPL-Caltech: portada; 85b, 89a, 118a; NASA/JPL-Caltech/ASI/USGS: 121b; NASA/JPL-Caltech/MSSS: 159b; NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute: 113b, 115, 121a; NASA/JPL-Caltech/Universidad de Arizona: 89b; NASA/JPL/Corby Waste: 159a; NASA/JPL/USGS: 103a; NASA/JHUAPL/SwRI: 133; NASA/SDO: 52-53; NASA/SDO/Goddard Space Flight Center: 52.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8562-1

Depósito legal: B-13058-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	El sistema solar en la historia 13
CAPÍTULO 2	El Sol y su sistema 33
CAPÍTULO 3	El sistema solar interior 59
CAPÍTULO 4	El sistema solar exterior 97
CAPÍTULO 5	La exploración del sistema solar 139
LECTURAS RECOMENDADAS	163
ÍNDICE	165

Actualmente tenemos muchos conocimientos sobre el sistema solar y su historia. Para llegar hasta aquí ha hecho falta un largo recorrido. Los primeros modelos que utilizaron las antiguas civilizaciones para describir las trayectorias relativas de los astros en el cielo no consideraban que la Tierra se moviera de ninguna manera. Si bien la idea de que estábamos sobre un planeta que orbitaba alrededor del Sol ya apareció en la antigua Grecia, esta no se impuso hasta el siglo XVI. Tras los primeros viajes alrededor de la Tierra y la aparición de los primeros globos terráneos, se hizo evidente a ojos de todo el mundo que estábamos encima de un cuerpo esférico como los otros astros. La aceptación de las teorías heliocéntricas no fue inmediata, ya que el movimiento de la Tierra a gran velocidad por el espacio no era sencillo de aceptar. En todo caso, en los dos siglos siguientes al viaje de Colón se perfeccionaron toda una serie de teorías que consolidaron la idea de que era la Tierra la que giraba alrededor del Sol. El broche de oro lo puso Newton con su teoría de la gravedad, que permitía calcular las distancias y las masas relativas en el sistema solar.

Hoy en día sabemos que el sistema solar es solamente uno de los cientos de miles de millones de sistemas estelares que

orbitan alrededor del centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea. La estrella más cercana al Sol es Próxima Centauri, situada a algo más de cuatro años-luz, es decir, la luz solar tarda cuatro años en llegar hasta allí. Aproximadamente a una cuarta parte de esa distancia se cree que empiezan a aparecer los cuerpos más alejados pertenecientes al sistema solar, pequeños cuerpos que fueron expulsados en las etapas iniciales de su formación. La teórica región que ocupan se llama *nube de Oort*, y aunque no se ha observado directamente, se cree que de allí provienen los cometas de periodo largo antes de cambiar ocasionalmente su dirección hacia posiciones más cercanas al Sol. Así pues, la luz del Sol tarda aproximadamente un año en llegar a los cuerpos más lejanos del sistema solar. Para llegar a Neptuno tarda unas cuatro horas, y a la Tierra, alrededor de ocho minutos. Vemos, pues, que nuestro planeta ocupa una posición relativamente central en el sistema solar; aun así, su distancia al Sol es enorme. La misma luz que tarda ocho minutos en recorrer la distancia del Sol a la Tierra, tardaría un solo segundo en recorrer la distancia equivalente a siete vueltas y media a nuestro planeta.

En cuanto a la edad del sistema solar, todo indica que tiene varios miles de millones de años. Para tener una referencia, podemos considerar que el periodo transcurrido desde su nacimiento es aproximadamente un millón de veces mayor que el tiempo transcurrido desde el antiguo Egipto. Si el Sol fuera una persona de unos cuarenta años, desde la construcción de las primeras pirámides habrían pasado unos veinte minutos. Parece que tanto los planetas como sus satélites se formaron más o menos simultáneamente al Sol a partir de una gran nube de gas y polvo. Esto explicaría por qué la mayoría de sus órbitas y rotaciones son en el mismo sentido. La mayor parte de la materia que formaba la nube se concentró en el Sol. Su masa es tan grande que las presiones en su interior posibilitan cada segundo la fusión de centenares de millones de toneladas de átomos de hidrógeno en átomos de helio. En este proceso, unos pocos millones de toneladas de materia se transforman en una cantidad inmensa de energía. Parte de esta energía acaba siendo liberada en forma de partículas cargadas y ondas electromagnéticas. La pequeña porción de la

radiación electromagnética solar que llega a nuestro planeta ha proporcionado la energía suficiente para el desarrollo de la vida.

La Tierra es el tercer planeta más cercano al Sol, por detrás de Mercurio y Venus y por delante de Marte. Estos cuatro planetas forman el llamado *sistema solar interior*. Los otros cuatro, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, constituyen el *sistema solar exterior*. La región que ocupa el sistema solar interior es relativamente pequeña en comparación con la que ocupa el exterior. La distancia media de Neptuno al Sol es unas veinte veces mayor que la de Marte. Esta proporción se puede visualizar imaginando la órbita de Marte como el tapón de una botella y la órbita de Neptuno como una pizza familiar. Los planetas del sistema solar interior tienen un tamaño mucho menor y son principalmente cuerpos rocosos, por lo que se conocen como *planetas terrestres*. Sus densidades son algo mayores pero, aun así, sus masas son un orden de magnitud menor que las de los planetas del sistema solar exterior. Cuentan con poquísimos satélites, solamente la Luna y dos pequeños cuerpos en Marte.

Los planetas del sistema solar exterior son mucho más grandes y están envueltos por enormes masas gaseosas, por lo que se conocen como *gigantes gaseosos*. Se caracterizan por tener complejos sistemas de satélites y anillos fuertemente interrelacionados, que interactúan también con los planetas. Los anillos están alimentados por partículas que escapan de los satélites, algunas de las cuales llegan incluso hasta los planetas siguiendo sus líneas de campo magnético. Por otro lado, las fuerzas de marea que ejercen estos masivos planetas sobre sus satélites son mucho más intensas que las de la Tierra sobre la Luna. Algunos de estos satélites tienen condiciones en las que podrían existir entornos con algún tipo de vida. Los más destacados son Europa, satélite de Júpiter, y Encélado y Titán, satélites de Saturno.

Aparte de los planetas, se pueden encontrar también multitud de pequeños cuerpos orbitando alrededor del Sol. Entre las órbitas de Marte y Júpiter, se extiende una región con una concentración relativamente alta de asteroides que se conoce como *cinturón de asteroides*. En ella se encuentra también el planeta enano Ceres. Más allá de la órbita de Neptuno existen multitud

de cuerpos menores que se pueden agrupar en regiones como el cinturón de Kuiper, el disco disperso o la nube de Oort. En ellas existen también varios planetas enanos como Plutón. La distribución de todos estos cuerpos, incluidos los planetas, ha ido variando desde la formación del sistema solar. Se cree que inicialmente los planetas ocupaban posiciones más cercanas al Sol. En su proceso de migración a las posiciones actuales, muchos de los cuerpos menores habrían sido expulsados a las regiones remotas donde parece que se encuentran.

Hasta mediados del siglo xx, se realizaron infinitud de observaciones que dieron las distancias y masas absolutas de los planetas. Se descubrieron también Urano y Neptuno, los dos planetas desconocidos en la antigüedad. Hasta ese momento, toda la información que se tenía sobre el sistema solar se había obtenido a través de los telescopios. Esto cambió radicalmente con el inicio de la exploración espacial. Uno de los episodios más conocidos fue la llegada del ser humano a la Luna en 1969. Sin embargo, ya antes de esta fecha se habían enviado las primeras misiones no tripuladas a Venus y a Marte. En las décadas siguientes se enviaron también las primeras naves que sobrevolaron Mercurio, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Desde entonces las misiones planetarias se han sucedido de forma constante hasta la actualidad. Haber visitado todos estos planetas ha permitido tener una visión más detallada de sus características gracias a la obtención de datos *in situ*. Por ejemplo, se ha podido medir los campos magnéticos de Júpiter y Saturno, y descubrir su interesante relación con satélites y anillos.

Nuestros conocimientos sobre el sistema solar siguen evolucionando de manera constante. Recientemente se han detectado indicios de la existencia de un cuerpo varias veces más masivo que la Tierra más allá de la órbita de Neptuno. De hecho, lo que se ha detectado son ciertas anomalías en el movimiento de varios cuerpos menores, que podrían ser explicadas por la gravedad de un cuerpo de gran masa, aún no detectado. Se está usando la palabra planeta para referirse a él, aunque su órbita sería mucho más excéntrica y lejana que la de los planetas conocidos. Habrá que esperar a tener nuevos datos para confirmar esta po-

sibilidad, que cambiaría nuestra visión sobre lo que sucede más allá de la órbita de Neptuno.

Por otro lado, todo parece indicar que estamos a punto de enviar la primera misión tripulada a Marte en las próximas décadas. Si bien la Unión Soviética fue pionera, hay que reconocer que en los últimos tiempos gran parte del peso de la exploración espacial lo ha llevado Estados Unidos. También han aparecido nuevos actores, como Europa y Japón, que están haciendo algunas aportaciones importantes. En los próximos años veremos qué propuestas se articulan finalmente para llevar seres humanos a la superficie marciana.

El sistema solar en la historia

Colón no se lanzó a un viaje imposible sin ninguna garantía. La creencia en la esfericidad de la Tierra se remontaba al menos a la antigua Grecia. Sin embargo, hubo que esperar al siglo XVI para que pasase a ser un hecho aceptado por todo el mundo.

Apenas se distinguen unas pocas estrellas en el cielo nocturno de las ciudades donde vivimos la mayoría de nosotros. Es un cielo muy distinto del que podían ver los primeros seres humanos sobre la Tierra. Para ver algo parecido en la actualidad nos tenemos que desplazar a zonas poco pobladas y lumínicamente no contaminadas. De este modo, podremos observar infinitud de estrellas y galaxias, incluida la nuestra, la Vía Láctea, que es esa banda borrosa fácilmente identificable que atraviesa el cielo nocturno. Con cierta práctica podremos identificar también algunas otras galaxias, estrellas o planetas; incluso existen aplicaciones para el móvil que nos dicen dónde está cada una.

Hoy en día tenemos mucha información sobre las galaxias, estrellas y planetas, pero para los primeros humanos que dirigieron la vista al cielo nocturno eran solo puntos indistintos que brillaban. Para ellos, el papel protagonista lo tenía la Luna, cuyas fases de luz y sombra eran usadas como referencia temporal intermedia entre los días y las estaciones. En la predicción de las estaciones jugaba un papel fundamental la trayectoria que dibujaba el Sol en el cielo diurno. Cuando se acercaba el invierno, cada día era ligeramente más corta y su punto alto estaba

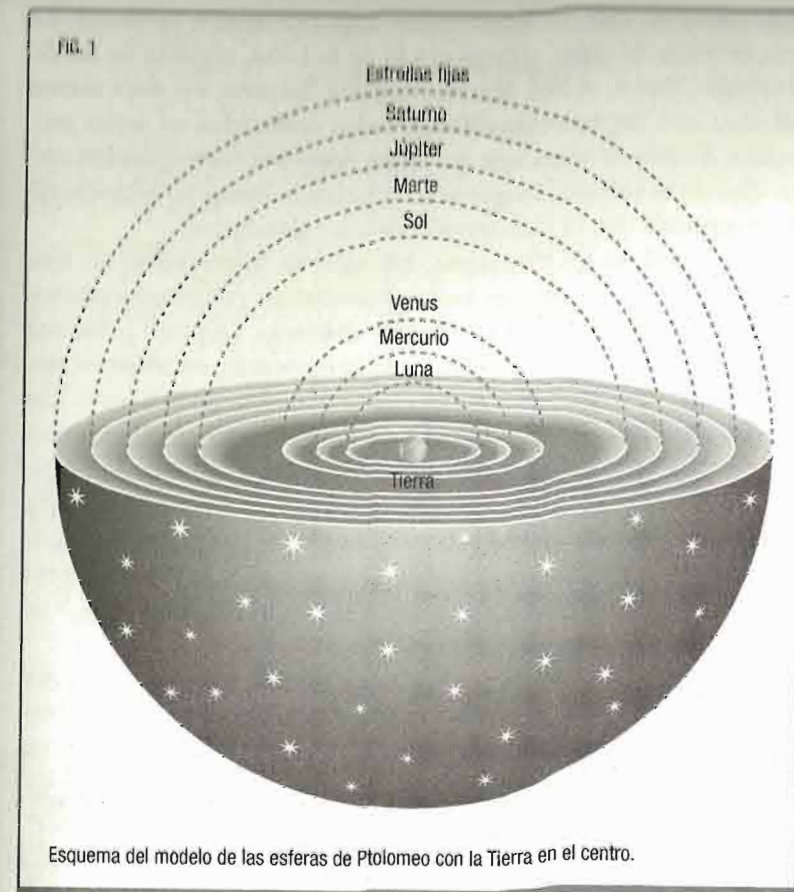
un poco más próximo al horizonte. Aparte de estas pequeñas variaciones, el Sol siempre salía, alcanzaba su cenit y se ponía aproximadamente en las mismas direcciones, que se podían usar como referencias espaciales. También era posible encontrar referencias espaciales en el cielo nocturno. Las estrellas y la Vía Láctea presentaban un giro aparente alrededor de un punto (estrella Polar en el hemisferio norte y estrella del Sur en el hemisferio sur) siempre dispuesto en la misma dirección.

Es posible que algunos repararan también en aquel punto algo más luminoso que se veía en unas ocasiones al atardecer y en otras al amanecer, pero siempre cerca del Sol. Venus, así como los otros planetas, presentaba un comportamiento más errático que no fue estudiado con detalle hasta las primeras grandes civilizaciones. A continuación, vamos a hacer un repaso desde los primeros modelos celestes del mundo antiguo, en los que el Sol aún figuraba como un astro más que giraba alrededor de la Tierra, hasta nuestro modelo actual del sistema solar en el universo.

EL MUNDO ANTIGUO

Con toda probabilidad, el ser humano ha percibido desde el principio de sus días la regularidad de los movimientos celestes. Gracias a las observaciones astronómicas se podía predecir la llegada de las estaciones y tener referencias espaciales en la propia Tierra. Probablemente en multitud de ocasiones fue de vital importancia poder predecir cuánto quedaba para la estación fría o en qué dirección había que emigrar en busca de climas más cálidos. Desde la estabilización de núcleos de población agrícolas durante el Neolítico, seguramente creció aún más el interés en la astronomía para poder predecir con la máxima exactitud la llegada de las estaciones. En las antiguas civilizaciones se fueron perfeccionando los modelos para describir los movimientos de los astros a la vez que los calendarios.

Uno de los primeros testimonios de tales modelos que ha llegado hasta nuestros días es el de Claudio Ptolomeo, que vivió en la Alejandría romana en el siglo II d.C. Su «gran tratado» *Hè Megalè*



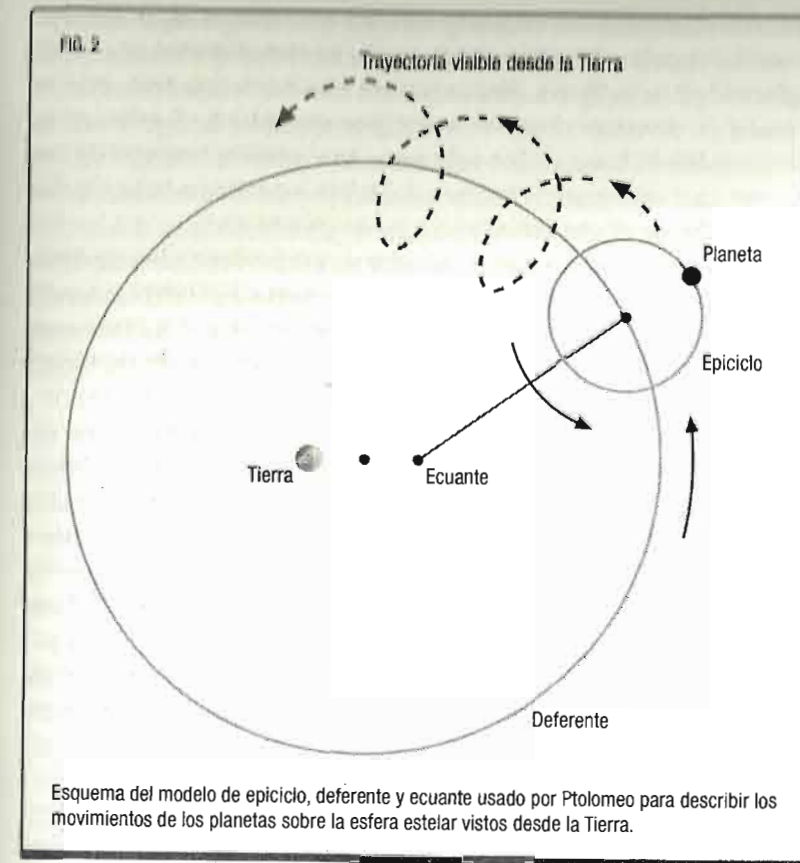
Syntaxis, también conocido como *Almagesto* por habernos llegado a través de su traducción al árabe, recogía siglos de tradición de la astronomía griega. En él se describían de forma bastante precisa las trayectorias vistas desde la Tierra de las estrellas, el Sol, la Luna y los planetas. Se consideraba que la Tierra estaba situada en el centro del universo y que estrellas, Sol, Luna y planetas giraban a su alrededor (figura 1). Las estrellas estaban fijas sobre una esfera, *primum mobile*, que daba aproximadamente una vuelta diaria. El Sol, la Luna y los planetas presentaban movimientos propios adicionales y se consideraba que estaban

dispuestos en esferas intermedias más cercanas a la Tierra. La más cercana de estas esferas era la de la Luna, seguida de las de Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter y Saturno, los siete astros celestes con trayectorias diferenciadas conocidos en aquel momento. A nadie se le escapa que estos nombres corresponden con los días de la semana, lo que nos recuerda la estrecha relación de la astronomía con la elaboración de los calendarios.

En el modelo de Ptolomeo, las esferas intermedias se movían con la esfera estelar, pero presentaban rotaciones adicionales con inclinaciones ligeramente distintas. La parte principal de cada una de estas inclinaciones corresponde, en nuestro modelo actual, a la inclinación del eje de rotación de la Tierra. Las ligeras variaciones corresponden a las pequeñas inclinaciones de los planos orbitales de los otros planetas y la Luna. El ángulo de la esfera del Sol había sido el primero en ser identificado y se correspondía con el ángulo del plano de su trayectoria aparente sobre la esfera estelar a lo largo de un año. Esta trayectoria era conocida como *eclíptica*, ya que señalaba el plano en que se producían los eclipses.

El Sol y la Luna estaban dispuestos en esferas sencillas. Este no era el caso de los planetas, ya que sus trayectorias vistas desde la Tierra presentaban varias dificultades. Para empezar, su distancia a la Tierra y su velocidad relativa a la esfera estelar podían variar mucho a lo largo del año. La variabilidad de la distancia se suponía por la variabilidad del brillo, especialmente notable en el caso de Marte. En cuanto a la velocidad relativa a la esfera estelar, podía disminuir hasta detenerse e incluso, en ocasiones, cambiar esporádicamente de sentido. Para describir con precisión estas trayectorias con distancias cambiantes y aparente movimiento retrógrado, no bastaba con esferas concéntricas, sino que se necesitaban varios trucos geométricos.

Las trayectorias de los planetas estaban descritas por una estructura de varios círculos (figura 2). Los planetas giraban alrededor de un círculo menor, llamado *epiciclo*, que a su vez giraba alrededor de un círculo principal, llamado *deferente*, situado alrededor de la Tierra. En el caso de Venus y de Mercurio, que siempre aparecían cerca del Sol, se consideraban sus epiciclos



centrados en la línea que iba de este último a la Tierra. Para ajustar aún más el modelo a las observaciones, era necesario considerar unas deferentes excéntricas y velocidades variables solamente percibidas como constantes desde otros puntos excéntricos llamados *ecuantas*. El modelo era bastante complejo, ya que estas excentricidades eran diferentes para cada planeta. Sin embargo, era capaz de predecir los movimientos de los planetas con bastante exactitud y siguió vigente como manual de referencia hasta el siglo XVI.

Aunque el modelo de Ptolomeo consideraba la Tierra fija y los otros astros en movimiento a su alrededor, ya habían existido con

anterioridad modelos en los que el Sol ocupaba el lugar central. Uno de los primeros pasos hacia estos modelos era reconocer la esfericidad de la Tierra. Entonces era una mera hipótesis que se basaba en diversas observaciones, por ejemplo, la sombra de la Tierra sobre la Luna en los eclipses o la visibilidad parcial de los barcos una vez cruzada la línea del horizonte. Era una hipótesis que gozaba de cierta difusión, como se puede deducir del hecho de que Eratóstenes llegase a calcular su perímetro. Aceptando la esfericidad de la Tierra, otros filósofos griegos habían planteado que era ella, y no las estrellas fijas, la que rotaba, o incluso que simplemente era un planeta más girando alrededor de un fuego central.

Uno de los primeros modelos completos en que la Tierra orbitaba alrededor del Sol había sido propuesto por Aristarco de Samos tras estimar distancias y tamaños relativos de la Tierra, la Luna y el Sol. Considerando recto el ángulo Tierra-Luna-Sol cuando exactamente la mitad de la Luna estaba iluminada y midiendo el ángulo Sol-Tierra-Luna, dedujo por trigonometría que el Sol era mucho mayor que la Tierra. El hecho de que el Sol fuera una esfera mayor que la Tierra y con luz propia, le llevó a plantear su hipótesis heliocéntrica. Hoy en día sabemos que sus mediciones no fueron muy exactas, pero la conclusión se adelantó casi dos milenios a lo aceptado por la comunidad científica.

De todas formas, las teorías heliocéntricas gozaron de escasa o nula difusión hasta el viaje de Colón al Nuevo Mundo. Tras la apertura de rutas marinas alrededor de la Tierra durante el siglo XVI, se hizo evidente que la Tierra era esférica como los otros astros. Cuando la esfericidad de la Tierra dejó de ser una hipótesis para ser un hecho, el principal problema de las teorías heliocéntricas pasó a ser la difícil aceptación de que la Tierra estuviera en movimiento.

EPPUR SI MUOVE

Tras los viajes de Colón, la aparición de innumerables representaciones de globos terráqueos y la evidencia de que la Tierra era

esférica, se llegó a un punto en que las hipótesis heliocéntricas empezaron a tener más aceptación y difusión. Estas teorías se acabaron imponiendo en los siglos XVI y XVII gracias a personajes como Copérnico, Kepler y Galileo.

Como hemos visto, el modelo geocéntrico de Ptolomeo podía describir con bastante precisión el movimiento de los planetas. Sin embargo, necesitaba para ello de muchos trucos matemáticos introducidos *ad hoc* que no estaban apoyados en ninguna hipótesis. Esto era algo que disgustaba a muchos, como al astrónomo polaco Nicolás Copérnico. Este presentó en 1543 su sistema heliocéntrico, que permitía predecir las posiciones de los planetas con la misma precisión que el de Ptolomeo pero con menos artificios matemáticos.

El modelo de Copérnico establecía que la Tierra giraba sobre sí misma cada día y completaba una vuelta al Sol cada año. Todos los demás planetas giraban también alrededor del Sol, siendo la Tierra solamente uno más entre ellos. El único astro que orbitaba alrededor de la Tierra era la Luna. El modelo tenía en cuenta también la inclinación del eje de rotación terrestre, resolviendo así la cuestión de las esferas concéntricas y sus ángulos. En cuanto a las estrellas, al no presentar ningún movimiento relativo entre ellas tenían que estar a una distancia muchísimo mayor que las distancias entre el Sol y los planetas.

Casi todas las hipótesis planteadas por Copérnico se habían barajado ya con anterioridad, pero en su obra aparecieron concretadas en un modelo que permitía predecir las posiciones de los planetas. Valiéndose de su modelo y midiendo los ángulos Sol-Tierra-planeta en momentos determinados, Copérnico calculó mediante trigonometría las distancias relativas del Sol a los planetas. Usó como referencia la entonces desconocida distancia Sol-Tierra o unidad astronómica (UA). Las distancias relativas y los periodos de revolución que resultaron eran muy parecidos a los actuales y mostraban una estructura tan regular que los utilizó como prueba de la bondad de su modelo.

El movimiento de la Tierra sola basta para explicar tantas desigualdades aparentes en los cielos.

NICOLÁS COPÉRNICO

Geométricamente hablando, el modelo de Copérnico estaba lejos de ser perfecto y solo permitía eliminar algunos de los trucos matemáticos de la propuesta de Ptolomeo. No se había desprendido aún de algunas de sus ideas y guardaba cierta complejidad en forma de epiciclos. Otro problema era que no mejoraba la precisión en las predicciones. Esta mejora en la precisión la logró el astrónomo alemán Johannes Kepler perfeccionando la descripción de los movimientos planetarios y eliminando por completo la complejidad de los epiciclos. Cabe decir que esta descripción no hubiera sido posible sin la exactitud de las observaciones del astrónomo danés Tycho Brahe.

Según las dos primeras leyes de Kepler, los planetas se movían a lo largo de órbitas elípticas y su velocidad aumentaba con su proximidad al Sol, que estaba situado en uno de los focos. Eran tan precisas estas leyes que fue el primer astrónomo en predecir con éxito un tránsito de Venus por delante del Sol. Kepler también formuló una tercera ley, que relacionaba el periodo orbital de un planeta con su radio orbital máximo. A partir de entonces se pudieron conocer con precisión las distancias relativas entre dos planetas cualesquiera o entre un planeta y el Sol en un momento concreto. Seguía aún indeterminada la escala del sistema solar, cuyo último planeta conocido era entonces Saturno. Para determinarla bastaría con averiguar una única distancia absoluta.

Otro de los personajes destacados en la aceptación del heliocentrismo fue el astrónomo italiano Galileo Galilei. Sus observaciones astronómicas con un sencillo telescopio que él mismo había perfeccionado sirvieron para recopilar una serie de pruebas que desproveían a la Tierra de su carácter especial. Por ejemplo, sus observaciones de la Luna le llevaron a identificar relieves en ella. Una Tierra cuya esfericidad era ya aceptada por todo el mundo no parecía tener nada de especial respecto a los otros astros como la Luna, más aún si esta última también tenía relieves.

De entre todas las observaciones de Galileo, quizá las más importantes fueron las de las fases de luz y sombra de Venus. Este planeta, que solo se podía observar al alba o en el ocaso, por estar siempre cerca del Sol, presentaba fases de luz y sombra, como la Luna. Esto implicaba que a veces estaba delante y a ve-

LEYES DE KEPLER: LA COREOGRAFÍA DE LOS PLANETAS

Las leyes de Kepler describen el movimiento planetario dentro del sistema solar. Se suelen presentar las tres juntas, aunque la tercera se publicó con posterioridad a las dos primeras.

- Primera ley: Los planetas se mueven siguiendo órbitas en forma de elipse con el Sol en uno de sus focos.
- Segunda ley: La línea trazada desde un planeta hasta el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales. Esta ley es equivalente a la constancia del *momento angular*, es decir, cuando el planeta está más cerca del Sol su velocidad es mayor que cuando está más lejos.
- Tercera ley: Para todos los planetas que orbitan alrededor del Sol, la razón entre el periodo orbital (T) al cuadrado y el radio orbital máximo (r) al cubo se mantiene constante:

$$\frac{T^2}{r^3} = \text{constante.}$$

El secreto de las órbitas

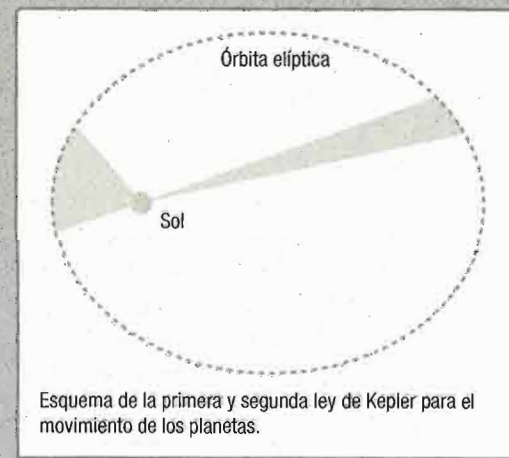
Gracias a la tercera ley, se pudo llegar a la fórmula del inverso del cuadrado de la distancia para la *ley de gravitación universal*. Según la segunda ley de Newton, la fuerza necesaria para ejercer una aceleración (a) que mantenga en una órbita circular a un planeta de masa m es:

$$F = am = \frac{v^2}{r} m,$$

donde v es la velocidad del planeta. Sabiendo que la velocidad se puede expresar como el ratio entre el perímetro y el periodo de la órbita, se pueden combinar las dos expresiones:

$$F = \frac{v^2}{r} m = \frac{(2\pi r)^2 m}{T^2 r} = \frac{4\pi^2 m}{T^2} = \frac{GMm}{r^2},$$

donde k es una constante para el sistema solar, que Newton identificó como el producto de la masa del Sol, M , y una constante de gravitación universal, G .



ces detrás del Sol, con lo que al menos este planeta sí orbitaba a su alrededor. Modelos que situaban a los planetas interiores, Mercurio y Venus, alrededor del Sol ya se venían utilizando desde finales del Imperio romano. Gracias a las observaciones de Galileo quedaba demostrado que era un hecho. Más importante aún: no todos los astros tenían que girar alrededor de la Tierra. También apoyó esta última afirmación con el descubrimiento de cuatro satélites de Júpiter.

Aun siendo las observaciones de Galileo trascendentales, sus aportaciones más importantes fueron teóricas. Una de las principales dificultades para la aceptación del sistema heliocéntrico era el hecho de que la Tierra estuviera en movimiento. A nosotros, que «sabemos» desde niños que la Tierra gira alrededor del Sol, nos parece «normal» que se mueva a miles de metros por segundo por el espacio. Para muchos pensadores del siglo XVII esto era absurdo, ya que imaginaban que ese movimiento crearía grandes vientos, que no habían sido detectados. Para dar respuesta a estos reparos, Galileo desarrolló el concepto de *inercia*. Se trata de la resistencia de los objetos a cambiar su velocidad a menos que se ejerza alguna acción sobre ellos. Al tener todos los objetos sobre la Tierra la misma velocidad, esta no se percibe. El heliocentrismo era un tema controvertido que se utilizaba a veces en las luchas de poder entre las élites eclesiásticas. Galileo, aun estando al margen de estas luchas, pagó un «pequeño» precio por su defensa: pasó en arresto domiciliario sus últimos años de vida. Sin embargo la Tierra, efectivamente, se mueve.

EL MODELO ACTUAL

Una vez aceptado que la Tierra y los otros planetas orbitaban alrededor del Sol, se abrió el camino para una serie de perfeccionamientos del conocimiento del sistema solar. Una de las primeras cosas que se determinaron fue su escala. Como ya hemos visto, las leyes de Kepler permitían precisar las distancias relativas del sistema solar. Conociendo la distancia absoluta entre dos planetas cualesquiera o entre un planeta y el Sol en un momento deter-

minado, se obtenía la escala del sistema solar y todas las demás distancias absolutas. La estimación que usaba Kepler para la unidad astronómica estaba muy por debajo del valor actual.

La primera distancia absoluta que se midió con una precisión aceptable fue la distancia Tierra-Marte mediante el método de la paralaje, en la segunda mitad del siglo XVII. Una de las primeras mediciones fue realizada de forma conjunta por el astrónomo francés Jean Richer, que estaba al frente de una expedición científica a Cayena, en la Guayana Francesa, y el italo-francés Giovanni Cassini, que se había quedado en París. Observando simultáneamente las distintas posiciones relativas de Marte respecto a las estrellas, y conocida la distancia de Cayena a París, Cassini pudo calcular la distancia a Marte en el momento de la medición. Con ese dato determinaron la escala del sistema solar con menos de un 7% de error. Ya en el siglo XVII, el astrónomo inglés Edmund Halley perfeccionó un método para medir la distancia Tierra-Venus durante los tránsitos de este planeta por delante del Sol. En los tránsitos de 1761 y 1769 se llevaron a cabo centenares de observaciones, gracias a las cuales se pudo calcular la escala del sistema solar con tan solo un 2% de error. Las mediciones actuales con técnicas de láser y radar dan a la unidad astronómica un valor de 149,6 millones de kilómetros.

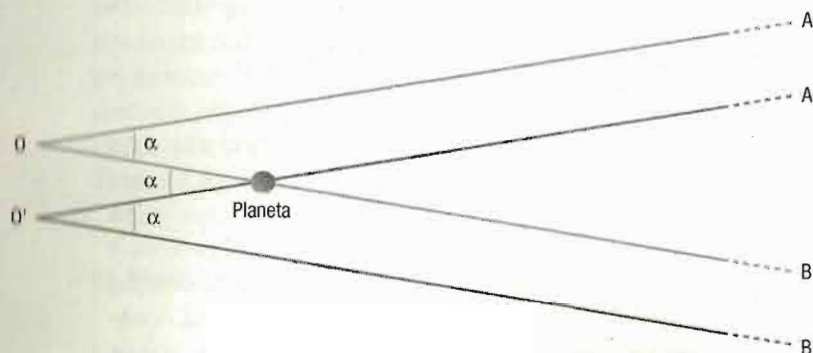
En cuanto a las masas de los planetas, hubo que esperar a que Newton formulara su teoría de la gravedad y a que posteriormente Cavendish midiera sus efectos en un laboratorio. Los primeros pasos para llegar a la teoría de la gravedad ya fueron dados por Galileo. Tras estudiar la trayectoria curva de las balas disparadas por cañones, concluyó que esta se podía describir separando los componentes horizontal y vertical de la velocidad inicial con la que salía la bala. El horizontal se mantenía constante, mientras que el vertical sufría una aceleración constante debida a la atracción terrestre. La trayectoria descrita con este método coincidía con una parábola. Por otro lado, la aceleración provocada por la atracción terrestre sobre los objetos no dependía de su masa, de tal forma que si pudiéramos tirar una pluma y una bala de cañón desde lo alto de la Torre de Pisa en ausencia de aire, ambas tardarían lo mismo en llegar al suelo.

CARTOGRAFIANDO EL SISTEMA SOLAR

En el siglo XVII se conocían las distancias relativas entre los planetas del sistema solar y el Sol gracias a las leyes de Kepler. Para conocer la escala del sistema solar bastaba con conocer una sola distancia absoluta, a partir de la cual podrían deducirse todas las demás. Una de las primeras mediciones de la distancia de la Tierra a otro planeta con una precisión aceptable fue realizada para Marte por los astrónomos Jean Richer y Giovanni Cassini en 1671 con el método de la paralaje. Aunque el resultado obtenido estaba algunos millones de kilómetros por debajo de la distancia real, fue un cálculo bastante preciso y permitió hacerse una idea de las verdaderas dimensiones del sistema solar.

La profundidad del cielo

El método de la paralaje, conocido desde las antiguas civilizaciones, se basa en la variación de la posición aparente de un objeto dependiendo del punto de vista que se escoja. Se puede adaptar para medir la posición de un planeta de la forma siguiente. Si dos observadores, en dos puntos alejados sobre la superficie de la Tierra O y O', observan simultáneamente un planeta, ven que su posición relativa a las estrellas es ligeramente distinta. Como las estrellas están a una distancia mucho mayor que el planeta, se puede considerar que esa pequeña diferencia angular corresponde al ángulo O-planeta-O' visto desde el planeta. Conociendo este ángulo y la distancia entre O y O', se puede deducir la distancia al planeta.



Esquema del método de la paralaje: si, tomando como referencia las estrellas, el planeta es visto en la posición B por el observador situado en O y en la posición A por el observador situado en O', entonces el ángulo A-O-B (A-O'-B) es el mismo que O-planeta-O'. A (B) está tan lejos que las líneas que van de este punto a O y O' se pueden considerar paralelas.

Tomando las ideas de Galileo, Newton definió las leyes básicas sobre las que se sustenta toda la mecánica. La primera es una expresión del concepto de inercia. La segunda dice que la fuerza aplicada sobre un objeto es proporcional a la aceleración que experimenta y a su masa. En el caso de la gravedad terrestre, la fuerza de atracción que produce sobre los objetos es su peso. La tercera y más famosa señala que: «Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria». Es decir, un objeto que cae al suelo atrae a la Tierra con la misma fuerza que esta atrae al objeto, pero la aceleración que le causa es imperceptible al ser su masa mucho menor. A partir de aquí, definió la fuerza de atracción gravitacional entre dos cuerpos como proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. Esta proporcionalidad se convertía en igualdad aplicando una constante de gravitación universal.

Según Newton, la Luna giraba a una cierta velocidad alrededor de la Tierra sin escapar porque era atraída por la misma fuerza que hacía que los objetos cayesen al suelo. Al ser la masa de la Tierra mucho mayor que la de cualquier objeto situado sobre ella, su atracción se percibe en la superficie como una aceleración constante de los objetos. Su teoría se podía usar para calcular tanto las trayectorias de las balas de los cañones como las de los planetas. La única excepción era la de Mercurio, que presentaba una irregularidad que no se pudo explicar hasta el siglo XX en el marco de la teoría de la relatividad.

La teoría de la gravedad, al incorporar las leyes de Kepler como casos especiales, servía para calcular las distancias relativas entre los astros del sistema solar, pero también para calcular sus masas relativas. Para determinar las masas absolutas era necesario definir la masa de uno de los planetas, que daría el valor de la constante de gravitación universal. El propio Newton sugirió dos métodos para calcular esta constante. Uno consistía en medir la desviación de la plomada respecto de la vertical cerca

Si alguna vez he hecho descubrimientos valiosos, se ha debido más a la observación paciente que a cualquier otra razón.

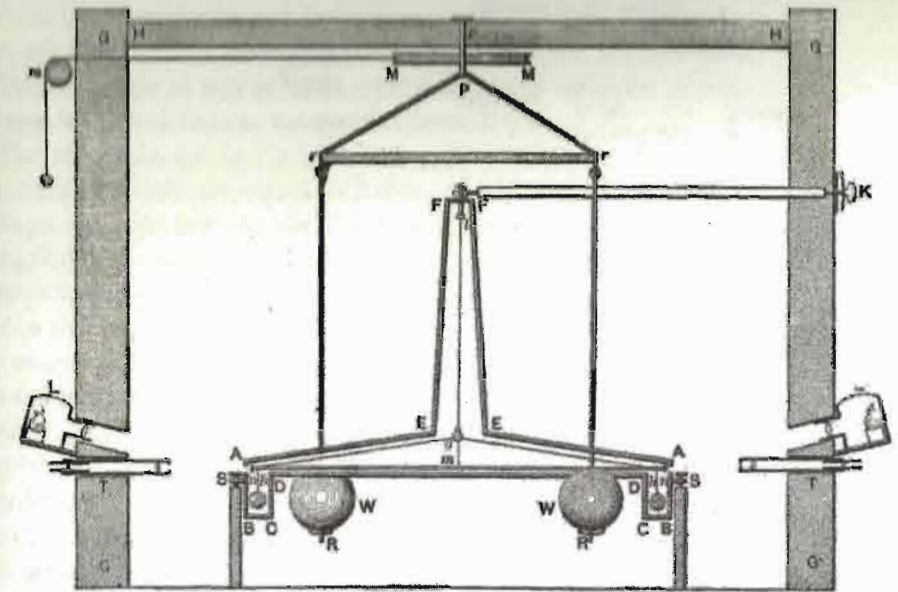
ISAAC NEWTON

de una montaña cuya masa se podía calcular, y el otro, en medir la fuerza de atracción entre dos masas conocidas separadas por una distancia conocida.

El segundo método, de muy difícil ejecución, no fue llevado a cabo con éxito hasta un siglo después por Henry Cavendish. Usó una balanza de torsión extremadamente sensible aislada de las corrientes de aire y de los cambios de temperatura. El aparato (figura 3) constaba de un brazo de madera en posición horizontal suspendido de un hilo. De sus extremos colgaban dos esferas idénticas de plomo. El aparato constaba de otras dos esferas de plomo de mayor tamaño, cuya posición se podía fijar cerca de las pequeñas. Una vez fijadas las mayores, el brazo giraba hasta que la fuerza gravitacional existente entre esferas pequeñas y grandes se equilibraba con la gravedad terrestre. La medición del ángulo del brazo, que se movía solamente unos pocos milímetros, se realizaba desde el exterior con un telescopio. Conociendo este ángulo y la resistencia del brazo a la torsión, Cavendish efectuó los cálculos necesarios y obtuvo que la densidad de la Tierra era 5,4 veces la del agua. Con este dato se podía calcular su masa y la constante de gravitación universal de Newton.

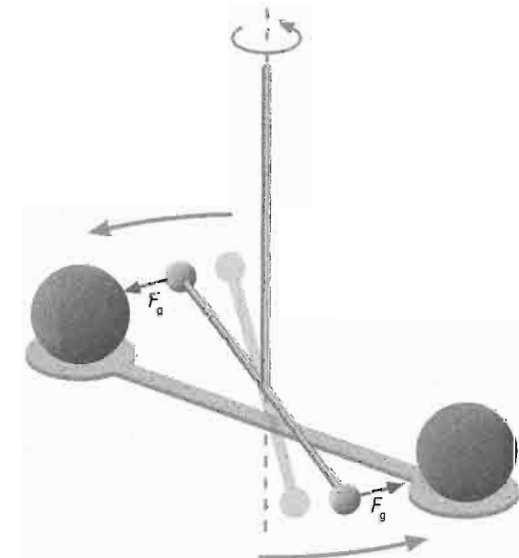
El sistema solar quedó configurado como lo conocemos en la actualidad (figura 4) cuando se descubrieron Urano y Neptuno, gracias a la creciente precisión de los telescopios y al desarrollo de las leyes de la mecánica. Urano fue identificado como planeta en 1781 por William Herschel. Aunque inicialmente lo describió prudentemente como un cometa, pronto se aceptó la idea de que era el séptimo planeta, cuya distancia al Sol era dieciocho veces la unidad astronómica. Las observaciones de Urano realizadas en las décadas siguientes indicaban unas importantes perturbaciones en su órbita. Alexis Bouvard formuló la hipótesis de que probablemente estaba perturbado por otro astro. Neptuno se identificó por primera vez como un planeta el día 23 de septiembre de 1846, exactamente en la posición calculada por Urbain Le Verrier a partir de las perturbaciones de la órbita de Urano. Parece ser que John Couch Adams, por su parte, había realizado de forma independiente una predic-

FIG. 3

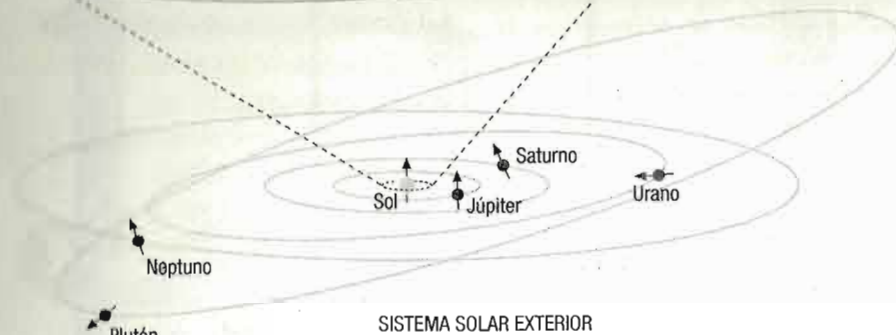
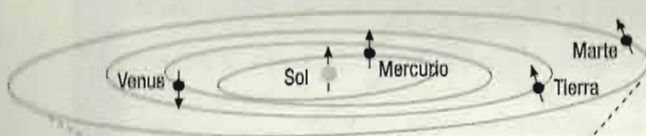


Arriba, copia del esquema de la balanza de torsión realizado por el propio Cavendish para ilustrar su artículo «Experimentos para determinar la densidad de la Tierra», publicado en *Philosophical Transactions* en 1798.

Abajo, un esquema más sencillo de su montaje. Dos masas pequeñas provocan una torsión en la varilla de la que están suspendidas, a causa de la atracción gravitatoria (fuerzas F_g) que experimentan hacia dos masas fijas mayores.



SISTEMA SOLAR INTERIOR



SISTEMA SOLAR EXTERIOR

Esquema del modelo actual del sistema solar con los planetas orbitando alrededor del Sol. Los cuatro primeros planetas están concentrados en una región muy reducida (sistema solar interior) en comparación con la que ocupan los otros cuatro (sistema solar exterior). Podemos ver también el planeta enano Plutón, que fue considerado el noveno planeta durante gran parte del siglo xx.

ción similar. Plutón fue descubierto en el siglo xx; aunque de entrada fue catalogado como planeta, el descubrimiento de varios astros similares en las últimas décadas lo relegó a la categoría, creada en 2006, de *planeta enano*.

En cuanto al lugar que ocupa nuestro sistema solar en el universo, la idea del Sol como una simple estrella igual que las otras apareció poco después del modelo heliocéntrico de Copérnico. El astrónomo italiano Giordano Bruno llegó a esa conclusión tras leer en la obra de Copérnico que las estrellas estaban a una distancia muchísimo mayor que las distancias entre el Sol y los planetas. También apostó por la idea de un universo infinito e inmóvil. No es extraño que alguien tan sagaz fuera acusado de desviarse de la doctrina. A diferencia de Galileo, Bruno recibió un castigo excesivo en forma de ejecución. Otro personaje cla-

ve en la superación del heliocentrismo fue Halley. Tras comparar las posiciones relativas de las estrellas obtenidas en su época con las observadas por los antiguos griegos, pudo constatar que algunas habían cambiado. Esta constatación desmontaba definitivamente la teoría de la esfera estelar y apoyaba la idea de que las estrellas eran astros similares al Sol.

Por otro lado, que la Vía Láctea era un conglomerado de estrellas había sido ya sugerido por Demócrito en la antigüedad y constatado por Galileo mediante observaciones. Hasta principios del siglo xx se creía que todas las estrellas formaban parte del mismo conjunto que la Vía Láctea. Fue en la década de 1920 cuando,

La Vía Láctea no es más que una masa innumerable de estrellas unidas en grupos.

GALILEO GALILEI

gracias a observaciones del astrónomo estadounidense Edwin Hubble, se comprobó que la Vía Láctea era tan solo una entre muchas galaxias. Hubble también observó que, teniendo en cuenta el efecto Doppler (cambio aparente de la frecuencia de una onda a causa del movimiento relativo entre una fuente y el observador) en la luz que nos llega de las galaxias, la mayoría se alejaban a velocidades directamente proporcionales a su distancia a la Tierra. El universo dejó así, definitivamente, de ser considerado inmóvil. A mediados del siglo xx, el astrónomo ucraniano George Gamow propuso que el universo se había creado tras una gran explosión inicial (Big Bang). Esta hipótesis recibió un gran impulso cuando, décadas más tarde, se descubrió la radiación de fondo de microondas que había predicho. Dicha radiación es una forma de onda electromagnética (luz) generada en el inicio del universo y que hoy nos llega en forma de microondas, motivo por el cual se conoce como el «eco» del Big Bang.

En la actualidad, el final que le espera a nuestro universo sigue siendo un tema en discusión. Las dos opciones extremas barajadas son que o bien se expande indefinidamente (Big Rip) o bien vuelve a colapsar sobre sí mismo (Big Crunch). La gran cantidad de datos recopilados en las últimas décadas gracias a potentes telescopios y radiotelescopios parecen indicar que el universo se encuentra en una fase de aceleración. Quién sabe qué nos de-

para el futuro. Si la Tierra es solo un planeta más, el Sol es solo una estrella más y la Vía Láctea es solo una galaxia más, quizá el universo sea solo «un universo más». Parece que nuestro sistema solar es insignificante, sin embargo, sigue siendo nuestro entorno inmediato y el lugar donde se centra la exploración espacial. Las próximas décadas se presentan interesantes, con una posible misión tripulada a Marte y varias misiones no tripuladas en búsqueda de indicios de vida en las lunas de Júpiter y Saturno.

El Sol y su sistema

Cada segundo unos pocos millones de toneladas de materia se transforman en energía en el interior del Sol. Es el resultado de la fusión de centenares de millones de toneladas de átomos de hidrógeno en átomos de helio. Este estado de equilibrio terminará el día que empiece a escasear el hidrógeno.

Hoy en día está claro que el Sol, por masa y capacidad de generar energía, ocupa el lugar central en el sistema que lleva su nombre. Su radio, de 696 000 km, es unas cien veces mayor que el de la Tierra y unas diez veces mayor que el de Júpiter, el planeta más grande. Si la Tierra fuera una canica de 13 mm de diámetro, Júpiter sería una pelota de 14 cm y el Sol una esfera de 1,4 m. La densidad del Sol, de 1400 kg/m^3 , es menor que la de la Tierra, aunque su masa es unas trescientas mil veces mayor. Tienen la misma relación de masas que existe entre una botella de leche y un avión comercial lleno. Sin embargo, lo que realmente marca la diferencia es la capacidad de generar energía. Para producir la energía generada por toda la humanidad durante un año, el Sol necesita poco más de un microsegundo (una millonésima de segundo). Tal cantidad de energía proviene de la fusión de centenares de millones de toneladas de átomos de hidrógeno en átomos de helio que se produce en su interior. En este proceso millones de toneladas de materia se transforman en grandes cantidades de energía según la teoría de la relatividad. La pequeña parte que llega a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas ha permitido el desarrollo de la vida tal y como la conocemos.

Actualmente, el Sol se encuentra en una fase de estabilidad que durará hasta que empiece a escasear el hidrógeno, dentro de miles de millones de años. Cuando eso suceda, disminuirán las reacciones de fusión, que dejarán de contrarrestar la presión gravitacional. La parte central empezará a contraerse y las capas exteriores a expandirse, convirtiéndose el Sol en una gigante roja cuyo radio puede superar el de la órbita terrestre. Tras otra fase de contracción y expansión, tendrá lugar un colapso gravitacional completo. Se convertirá entonces en una enana blanca, que se enfriará para acabar como una enana negra. Este modelo sobre el ciclo del Sol y sus reacciones ha sido elaborado apoyándose en multitud de observaciones de estrellas. Mediante el espectro electromagnético que emiten, han sido catalogadas estimando sus características. Como cada una de ellas se encuentra en una fase distinta de su vida, juntando todas las observaciones se han podido construir varios modelos de ciclos estelares que se ajustan a la teoría.

Por otro lado, se estima que el sistema solar tiene aproximadamente 4600 millones de años de antigüedad. Esta estimación se basa en la proporción de ciertos isótopos radiactivos en meteoritos encontrados sobre la Tierra (datación radiométrica). Para explicar cómo se originó, la hipótesis comúnmente aceptada en la actualidad es que tanto el Sol como todos los cuerpos que giran a su alrededor se formaron a partir de una gran nube de gas y polvo al sufrir un colapso gravitacional. Se cree que la nube, formada básicamente por hidrógeno y helio, era el residuo de una estrella anterior en la que se pudo generar el resto de elementos presentes en el sistema solar.

EL NACIMIENTO DEL SISTEMA SOLAR

La expresión *sistema solar* empezó a usarse a principios del siglo XVIII, tras el impulso definitivo que dio la teoría de la gravedad de Newton al modelo en que los planetas giraban alrededor del Sol. El movimiento descrito por las leyes de Kepler y Newton era estable y se repetía con periodicidad. No se había considerado to-

davía si el sistema solar había tenido un principio o tendría un fin. Fue entonces cuando surgieron las primeras hipótesis sobre su formación. La que ha aguantado mejor el paso del tiempo es la hipótesis nebular, cuya paternidad es compartida por personajes como Swedenborg, Kant o Laplace.

Su idea principal es que el sistema solar se empezó a formar tras el colapso gravitacional de lo que hoy llamamos una nube molecular. Esta hipótesis se ha sometido desde entonces a numerosos retoques para ajustarse a las observaciones que se han ido sucediendo hasta nuestros días.

La cantidad de datos que se han acumulado acerca de la formación de estrellas y sus sistemas planetarios desde que en 1990 se puso en órbita el Hubble es muy superior a la que se tenía hasta ese momento. De hecho, antes del Hubble nuestro sistema solar era el único conocido. Hoy en día los sistemas planetarios estelares conocidos superan los mil, cifra que aumenta con rapidez. La continua recopilación de datos hace que las hipótesis sobre formación y evolución de sistemas planetarios sufran modificaciones con relativa frecuencia. En todo caso, nuestra idea del sistema solar se aleja cada vez más de aquella idea perfecta de Kepler y Newton. Hoy en día tenemos incluso imágenes del proceso de formación de estrellas a partir de nubes moleculares cuyos tamaños se miden en años-luz. Se trata de extensas regiones en el interior de las galaxias, con densidad de materia suficientemente alta y temperatura suficientemente baja para que exista hidrógeno molecular.

Existen diversas hipótesis sobre los motivos que pudieron producir el colapso gravitacional en la nube que dio lugar al sistema solar. El análisis de algunos granos de polvo encontrados en meteoritos indica que en algún momento estuvieron en la región de influencia de una o varias supernovas. Una supernova no es más que una gran explosión estelar que puede ocurrir en varios escenarios, ya sea por el colapso gravitacional de una estrella muy masiva o por la interacción de dos estrellas en sis-

En medio de todo está el Sol. Pues ¿quién en este bellísimo templo pondría esta lámpara en otro lugar mejor, desde el que se pudiera alumbrar todo?

NICOLÁS COPÉRNICO

temas binarios. En estas explosiones se desprenden las capas externas de las estrellas, cuyos restos pueden formar nubes de gas y polvo enriquecidos con elementos masivos. Mediante este proceso se cree que apareció el pequeño porcentaje de elementos más masivos que el hidrógeno y el helio en la nube a partir de la que se formó nuestro sistema solar. Se piensa incluso que este fenómeno se puede haber repetido en varias ocasiones. Por otro lado, en las supernovas se producen potentes ondas de choque que pudieron ser las causantes del colapso gravitacional que desencadenó la formación del sistema solar.

El colapso gravitacional, matizado por las fuerzas electromagnéticas, la presión del gas y la rotación, empezó a dar una forma aplanada a la nube. Esta fue girando cada vez más deprisa para conservar el momento angular, como ocurre con los patinadores cuando recogen sus brazos desplegados. Esto explicaría por qué tanto las órbitas como las rotaciones de planetas, satélites y otros astros son casi siempre en el mismo plano y sentido. La mayor parte de la masa fue a parar a la región central y se convertiría en el Sol, mientras que el resto se aplanó aún más en un disco a partir del cual se formaron los otros cuerpos del sistema solar. En la región central, la presión y la temperatura fueron aumentando hasta que, al cabo de unos cien millones de años, se hicieron tan grandes que los átomos de hidrógeno se empezaron a fusionar en átomos de helio. Estas reacciones termonucleares acabaron por contrarrestar el colapso gravitacional y se llegó a un equilibrio que dio lugar al Sol como lo conocemos en la actualidad. En el disco circundante quedó solamente un pequeño porcentaje de masa, a partir de la cual se formaron los planetas, satélites y el resto de cuerpos menores. Se han observado discos de gas y polvo similares alrededor de estrellas jóvenes T Tauri.

En cuanto a la formación de los planetas, se cree que sucedió mediante un proceso de acreción. Los granos de polvo que orbitaban alrededor del joven Sol se fueron juntando en cúmulos cada vez mayores, hasta llegar a conglomerados de pocos kilómetros que fueron incorporando masa durante millones de años. En la región donde se formaron los planetas del sistema solar interior, Mercurio, Venus, la Tierra y Marte, la temperatura era

LAS ESTRELLAS T TAURI

La estrella T Tauri fue catalogada en 1852 por el astrónomo inglés John Hind en la constelación de Tauro. Actualmente se sabe que, aunque aparece en medio del cúmulo de las Híades, está en realidad cientos de años-luz por detrás. Da nombre a un tipo de estrellas jóvenes con características similares.

Estrellas variables

Las estrellas T Tauri se caracterizan por estar en fases iniciales de su formación. En su interior aún no han empezado a darse de forma estable las reacciones termonucleares de fusión de átomos de hidrógeno en átomos de helio. Al no darse aún las reacciones termonucleares que contrarresten el colapso gravitatorio, presentan un comportamiento inestable con gran actividad y variabilidad. Van perdiendo masa a través de un importante flujo de partículas subatómicas e iones en lo que es un violento viento estelar. Presentan también fuertes emisiones de rayos X y ondas de radio.

Nidos de estrellas

Las estrellas T Tauri se encuentran cerca de las regiones de formación estelar en las nubes moleculares. La mayoría forman parte de sistemas múltiples. En aproximadamente la mitad de las estrellas estudiadas se han observado discos circundantes de gas y polvo. Estos discos, a partir de los cuales se cree que se pueden formar sistemas planetarios, tienen diámetros de varias UA y temperaturas relativamente bajas, de 1000 K como máximo.

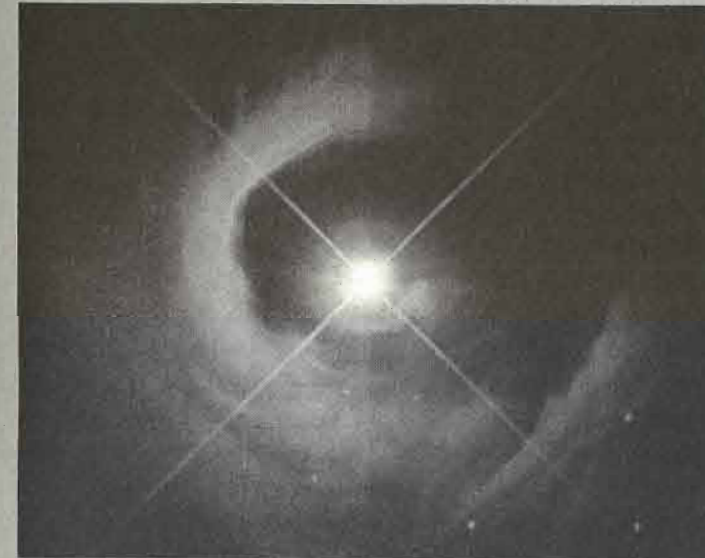


Imagen de la estrella V1331 Cyg tomada por el Hubble. Se trata de una imagen poco corriente, al estar uno de los polos de rotación del sistema dirigido exactamente hacia la Tierra.

GEOLÓGIA DE LOS PLANETAS DEL SISTEMA SOLAR

Los planetas del sistema solar interior, Mercurio, Venus, la Tierra y Marte, son pequeños, de superficie rocosa y sólida y densidad alta, y están constituidos por elementos pesados. Los planetas del sistema solar exterior, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, son grandes moles formadas sobre todo por elementos ligeros.

La razón es que, hace unos 5 000 millones de años, al tiempo que se formaban los planetas por acreción de la nube de polvo interestelar alrededor de núcleos más densos, los elementos se iban ordenando: los pesados se mantenían en órbitas más cercanas al Sol, mientras que los ligeros eran arrastrados por el viento solar hacia el exterior del sistema solar.

MERCURIO

Se compone de un 70% de elementos metálicos y de un 30% de silicatos. Hace unos 4 000 millones de años sufrió un intenso bombardeo de meteoritos. Volcánicamente activo, presenta cuencas, depresiones, llanuras y cordilleras.



VENUS

Está formado por llanuras, mesetas y montañas (más de 100 000 son volcanes). Grandes ríos de lava cubren las tierras bajas y han formado canales.



TIERRA

El 71% de la superficie está formada por agua. La corteza está compuesta por placas tectónicas, cuyos movimientos, además de los fenómenos volcánicos que generan, han determinado la orografía del planeta, formada por llanuras, mesetas, montañas y depresiones.



Núcleo
1 800 km de radio. Hierro, níquel y azufre



SATURNO

El elemento dominante en su composición es el hidrógeno, que se hace líquido en el interior. Presenta anillos visibles desde la Tierra.



Capa exterior
Hidrógeno y helio



URANO

Su superficie es azulada, pues el metano de su atmósfera absorbe la luz roja. Está circundado por anillos elípticos muy estrechos ricos en carbono.

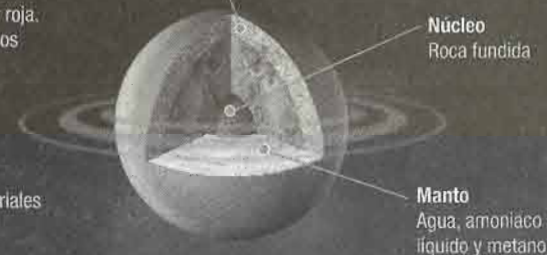
Núcleo
Entre el 4% y el 14% de la masa. Materiales rocosos



JÚPITER

Está cruzado por bandas de nubes oscuras y claras, compuestas de metano y amoníaco. Sus colores se deben a los compuestos de azufre, nitrógeno y fósforo.

Capa exterior
Hidrógeno, helio, agua, metano



NEPTUNO

Su color azul se debe a la presencia del metano en su atmósfera. Presenta manchas que recuerdan las de Júpiter.

demasiado elevada para que incorporaran compuestos volátiles. Son planetas rocosos, cuyos componentes principales tienen puntos de fusión altos. En la región donde se formaron los planetas del sistema solar exterior, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, los compuestos volátiles pudieron permanecer en estado sólido. Eso permitió que estos planetas incorporaran más masa. El proceso de acreción terminó cuando el viento solar barrió todo el gas y el polvo fuera del sistema.

Una de las dificultades a las que se ha enfrentado la hipótesis nebular es que, en el sistema solar, el momento angular no está uniformemente repartido. Está concentrado básicamente en los planetas, mientras que el Sol presenta una rotación más lenta de lo esperado. Para dar respuesta a este problema hay varias hipótesis no excluyentes. Según una de ellas, la velocidad de rotación disminuyó en la parte central debido a la fricción de las partículas de polvo en los estadios iniciales de formación. Otra propone que la parte central transfirió momento angular al disco mediante ondas de Alfvén, como se cree que pasa en las estrellas T Tauri. Se trata de ondas transmitidas desde las estrellas a través del gas ionizado que las rodea en la dirección de su campo magnético. La oscilación de los iones es posible por la tendencia a mantener su disposición proporcionada por el campo magnético.

Otra de las dificultades a las que se ha enfrentado la hipótesis nebular es que no puede explicar por sí sola la presencia de todo tipo de irregularidades en las órbitas y rotaciones. Muchos ejes de órbitas y rotaciones están inclinados respecto a la órbita de la Tierra. La mayor parte de estas inclinaciones son leves, pero hay algunos casos especiales. Por ejemplo, el eje de rotación de la Tierra presenta una inclinación de $23,4^\circ$ y el eje de la órbita de la Luna, de $5,1^\circ$. Quizá los ejemplos más extremos son el eje de rotación de Urano, de $97,8^\circ$, y el eje de la órbita del planeta enano Plutón, de $17,2^\circ$. Todas estas inclinaciones tienen cabida dentro del modelo nebular si se considera que el sistema solar ha experimentado una evolución desde sus inicios.

Se cree que, una vez que el viento solar barrió todo el polvo y el gas del sistema solar, su configuración era bastante distinta de

la actual y que los planetas han ido ajustando sus órbitas hasta nuestros días. Gran parte de las órbitas y rotaciones irregulares que hoy podemos observar se deberían a impactos, como por ejemplo la formación de la Luna a partir del choque de un gran cuerpo con la Tierra. Esta hipótesis surgió tras las misiones lunares y se basa en que la composición de la Luna es muy similar a la del manto terrestre. Este impacto explicaría las inclinaciones del eje de rotación de la Tierra y de la órbita de la Luna. Más aún, también serviría para explicar que la Luna sea prácticamente el único satélite del sistema solar interior, si exceptuamos dos pequeños cuerpos de tamaño mucho menor que orbitan alrededor de Marte.

Por otro lado, la evolución del sistema solar conllevó probablemente una migración de planetas. Parece poco factible que planetas tan grandes como Urano y Neptuno se hayan generado en las órbitas que ocupan en la actualidad. Según la hipótesis comúnmente aceptada, la configuración inicial del sistema solar contaba con un mayor número de cuerpos menores que la actual, que se muestra en la figura 1. La mayoría estaba en una región más lejana que la órbita de Neptuno. A su vez, la órbita de Neptuno era más pequeña que en la actualidad. La interacción entre estos pequeños cuerpos y los planetas hizo que algunos se trasladaran a posiciones más cercanas, mientras que los planetas más exteriores se desplazaban a órbitas más lejanas.

En el ajuste de órbitas, en algún momento se llegó a una resonancia 2:1 entre los periodos orbitales de Júpiter y Saturno. Es decir, Júpiter daba dos vueltas por cada una de Saturno, de tal forma que siempre coincidían a una distancia mínima en la misma posición. En ese momento las órbitas de Urano y Neptuno se expandieron, entrando de lleno el segundo en la región altamente poblada por pequeños cuerpos. Algunos de estos fueron desplazados hacia el exterior y otros hacia el interior en lo que se conoce como *bombardeo intenso tardío*. Este fenómeno fue el causante de gran parte de los impactos que se pueden percibir aún en forma de cráteres en la Luna y los planetas del sistema solar interior con actividad geológica limitada. Se cree también que gran parte del agua y otros compuestos del hidrógeno llega-



Esquema de la distribución actual estimada de los cuerpos menores en las regiones cercanas a las órbitas planetarias. Se pueden ver el cinturón de asteroides y el cinturón de Kuiper limitando las órbitas planetarias del sistema solar exterior por dentro y por fuera, respectivamente.

ron a la Tierra con el impacto de estos pequeños cuerpos. Los que consiguieron órbitas menos excéntricas e inclinadas están concentrados en el cinturón de Kuiper.

Hay que decir que la migración de planetas es una cuestión abierta. En las últimas décadas se han descubierto numerosos sistemas planetarios con todo tipo de configuraciones. Algunos de ellos tienen planetas de características similares a Júpiter con órbitas más pequeñas que la de Mercurio. Quizá no sean los más abundantes, pero son los más sencillos de detectar al estar muy cercanos a su estrella y tener periodos orbitales muy breves. Debido a estos periodos, de pocos días, y a su gran tamaño, es más

probable captarlos. El caso es que se ha comprobado que algunos de estos planetas presentan órbitas retrógradas, lo que hace necesaria una nueva revisión de las hipótesis actuales.

A lo largo de la historia la hipótesis de la nube molecular no ha sido la única existente. Durante algún tiempo se barajó la posibilidad de que los planetas se formasen al acercarse el Sol y otra estrella. Debido a su influencia gravitacional mutua, de ambas se habría desprendido materia, a partir de la cual se habrían formado los planetas. En los últimos años se han propuesto hipótesis similares que requieren de cuerpos ajenos al sistema solar, y que presentan algunos problemas. Según estas, el Sol tendría que ser más antiguo que los planetas, y parece que la datación radiométrica indica que todo el sistema solar se formó en la misma época. Hay que decir que ninguna de las hipótesis alternativas que han ido surgiendo compite con la ampliamente aceptada hipótesis nebular. Sin embargo, puede que algunos de sus aspectos se acaben mostrando útiles para complementarla en el futuro.

EL SOL, LA ESTRELLA PROTAGONISTA

El Sol se encuentra actualmente en una situación de equilibrio en la que la energía liberada por la fusión de átomos de hidrógeno en átomos de helio contrarresta el colapso gravitacional. Su radio medio y su masa son de 696 000 km y $2 \cdot 10^{30}$ kg, respectivamente, lo que supone una densidad media de 1 400 kg/m³, algo más de un cuarto de la densidad terrestre. Teniendo en cuenta que está formado básicamente por hidrógeno y helio, los dos elementos con una menor masa atómica, es una densidad relativamente alta, algo mayor que la del agua líquida. Esto se debe a que en el interior del Sol ambos elementos están sometidos a elevadísimas presiones, resultado de la gran concentración de masa. Se estima que los porcentajes totales de hidrógeno y helio sobre la masa solar son de un 74,9% y un 23,8%, respectivamente. De hecho, el helio fue detectado antes en el Sol que en la Tierra, en el siglo XIX, gracias al análisis de su espectro elec-

tromagnético. El 1,3% restante de la masa solar está formado por otros elementos, siendo los más abundantes el oxígeno, el carbono, el neón y el hierro. En menores cantidades, se pueden encontrar en el Sol casi todos los elementos químicos existentes en la Tierra.

El Sol posee un lento movimiento de rotación cuyo eje está inclinado $7,3^\circ$ respecto a la perpendicular del plano orbital terrestre. Es una rotación que presenta variaciones. Tiene un periodo de unos 25 días en el ecuador que aumenta varios días hasta los polos. Estos presentan achatamiento, al tratarse de un cuerpo de naturaleza eminentemente gaseosa. Este gas cambia su carácter con la profundidad, al aumentar de forma extraordinaria tanto la presión como la temperatura. Hay modelos que señalan la existencia en su interior de zonas diferenciadas con comportamientos distintos. En la zona central se producen reacciones de fusión atómica que liberan mucha energía, parte de la cual acaba siendo irradiada en forma de partículas con carga eléctrica y ondas electromagnéticas.

El flujo de partículas que irradia el Sol se llama *viento solar* y su región de influencia, *heliosfera*. Esta se extiende más allá de las órbitas planetarias, hasta que el viento solar deja paso al medio interestelar. Las ondas electromagnéticas, como la luz visible, pueden viajar mucho más allá, al igual que las de las galaxias más lejanas llegan hasta nosotros. De hecho, la radiación electromagnética es la que marca el límite del universo conocido, ya que no conocemos nada que viaje más deprisa. La pequeña parte de la radiación electromagnética solar que llega a la Tierra es suficiente para que se haya desarrollado la vida tal y como la conocemos. Desde las células vegetales hasta nuestros receptores oculares están perfectamente calibrados para aprovechar el rango de frecuencias en las que emite con más intensidad.

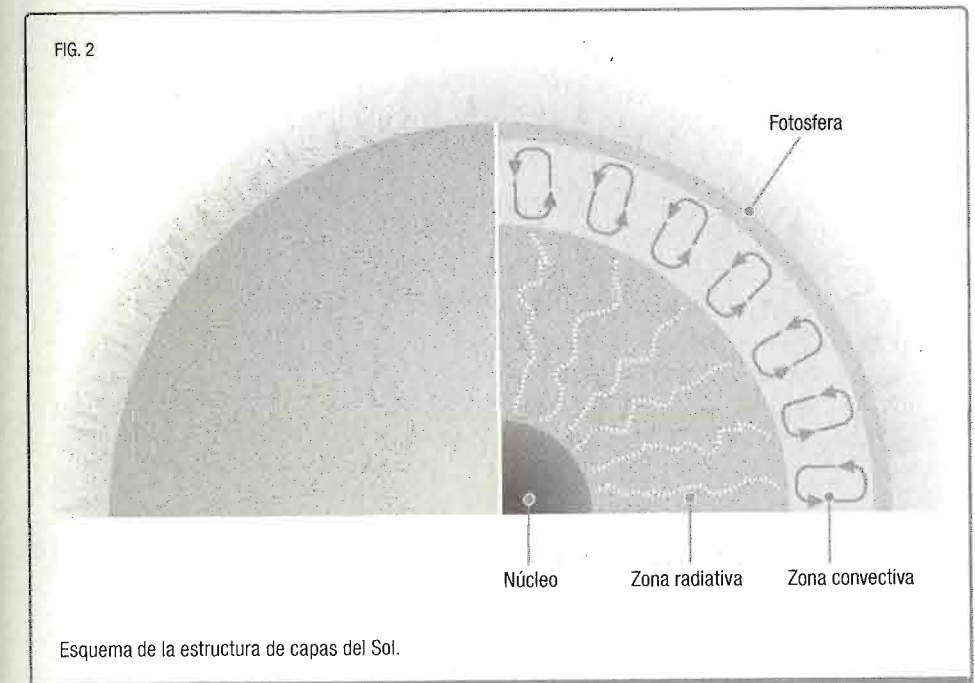
La estructura del Sol

Se pueden distinguir varias capas en el Sol, aunque sus límites no son sencillos de determinar. Se trata más bien de zonas en las

que predomina un cierto tipo de actividad física. Las principales son el núcleo, donde tienen lugar las reacciones de fusión, las zonas radiativa y convectiva, a través de las cuales tiene que pasar la energía liberada por el núcleo, y la fotosfera, donde la energía es emitida al espacio en forma de radiación electromagnética (figura 2). Esta estructura se ha establecido gracias al análisis teórico de las reacciones atómicas, así como al estudio de las oscilaciones que tienen lugar cerca de la superficie solar.

Existen incluso dos capas exteriores muy poco densas, la cromosfera y la corona, por las que se extienden las perturbaciones provocadas por el campo magnético solar. A continuación, veremos cada una de estas capas por separado.

La zona central o núcleo tiene un radio de un 20-25% del total. Su presión y su densidad son elevadísimas, llegan a alcanzar los $26 \cdot 10^{15}$ Pa y los $150\,000 \text{ kg/m}^3$, respectivamente. Es la zona donde se producen las reacciones de fusión de átomos de hidrógeno

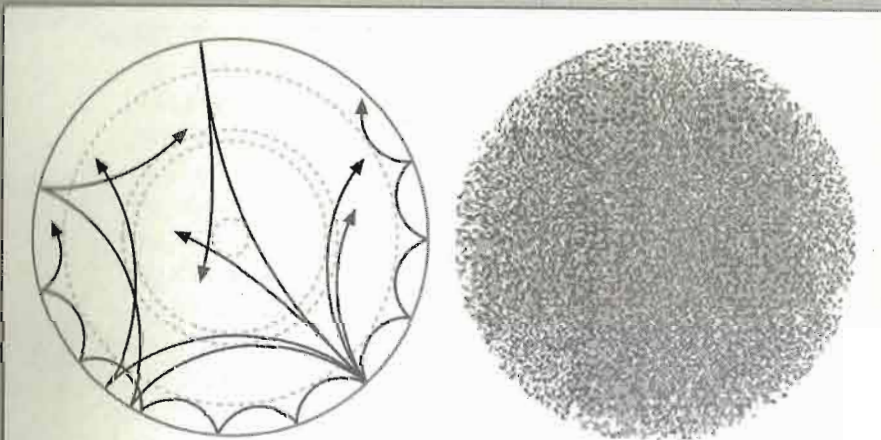


HELIOSISMOLOGÍA

La heliosismología es un campo relativamente nuevo dentro de la astronomía, que estudia las oscilaciones producidas por ondas de presión en el interior del Sol. Gracias al estudio de la propagación de estas ondas, se pueden deducir la configuración y las características de las distintas capas del Sol, de forma similar a como se usa la información de los sismos terrestres para conocer la estructura interna de nuestro planeta.

Auscultado el Sol

Parece ser que el Sol se comporta como una cavidad resonante. Las ondas que se propagan hacia el exterior son reflejadas cuando llegan a la superficie. Al mismo tiempo, las ondas que se propagan hacia el interior son progresivamente refractadas, conforme aumenta la temperatura, hacia otros puntos de la superficie. Estas oscilaciones se detectan gracias al corrimiento del espectro electromagnético solar debido al efecto Doppler. Es decir, según sea la velocidad del gas cerca de la superficie solar, el espectro electromagnético que nos llega presentará un desplazamiento hacia mayores o menores frecuencias. La información se viene recogiendo a través de observatorios espaciales como el SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), que orbita alrededor del Sol en una posición cercana a la Tierra. Tres de los doce experimentos que transporta este satélite son de heliosismología. Además, existen redes heliosismológicas mundiales, como la red GONG (*Global Oscillation Network Group*), que cuentan con potentes telescopios solares repartidos por varios continentes.



A la izquierda, esquema de cómo se cree que se propagan las ondas en el interior del Sol. La imagen de la derecha muestra la distribución de desviaciones en la velocidad del gas cerca de la superficie, detectadas teniendo en cuenta el efecto Doppler sobre el espectro electromagnético solar.

en átomos de helio. La proporción de helio en el núcleo es mayor que en el conjunto del Sol, llegando casi a la mitad. La otra mitad la forman hidrógeno y un 2% de otros elementos que pueden actuar como catalizadores en las reacciones, incrementando la velocidad de las mismas. De todas formas, la parte más importante de las reacciones se produce encadenando procesos subatómicos como la transformación de protones en neutrones. En estos procesos una pequeña cantidad de masa se transforma en enormes cantidades de energía, parte de la cual pasa a las capas superiores en forma de fotones. Se calcula que la temperatura en el núcleo puede alcanzar los 15 millones de grados centígrados.

La capa contigua al núcleo es la zona radiativa, que llega hasta un 70-85% del radio total. Es una capa formada básicamente por iones de hidrógeno y helio. En su base, la densidad y la temperatura son de unos 20 000 kg/m³ y de 7 · 10⁶ °C, valores que disminuyen con la distancia al núcleo hasta alcanzar unos 200 kg/m³ y 2 · 10⁶ °C, respectivamente. En este medio ionizado de alta densidad, los fotones provenientes del núcleo son constantemente absorbidos y emitidos. Este proceso de absorción y emisión retarda la llegada de la energía desde el núcleo hasta la siguiente capa. Se calcula que un fotón tarda unos diez días de media en atravesar la zona radiativa.

Por encima de la zona radiativa se encuentra la zona convectiva, que llega hasta casi el 100% del radio total. Esta capa es la responsable de la rotación diferencial observada en el Sol, que provoca rupturas con la zona radiativa, que rota como un sólido rígido. La estrecha franja de transición entre ambas recibe el nombre de *tacoclina*. En la zona convectiva el medio deja de estar ionizado y se produce una opacidad a la radiación. El gas opaco de la parte inferior se calienta por la absorción de fotones y sube hasta la siguiente capa. Cuando llega, vuelve a enfriarse por la emanación de fotones y baja de nuevo. La energía se transmite, pues, a la siguiente capa gracias a turbulentas corrientes circulares. Se calcula que un fotón tarda un mes de media en atravesar la zona convectiva.

Alrededor de la zona convectiva encontramos la fotosfera, que irradia la energía en forma de fotones u ondas electromag-

néticas que percibimos como luz. Es, por tanto, la parte del Sol que vemos y se considera su superficie. Consta de varios centenares de kilómetros de gas semitransparente, visible en mayor o menor medida hasta la profundidad en que se vuelve completamente opaco. La luminosidad del Sol es mayor en la parte central que en el perímetro, ya que en la parte central se acumula la radiación de zonas interiores más calientes. En el perímetro solamente se percibe de forma tangencial la radiación de las zonas más cercanas a la superficie. Con un telescopio se pueden apreciar en la fotosfera granos hexagonales algo más brillantes que su alrededor. Son la manifestación de la convección en la masa gaseosa en continua ebullición. Su temperatura se estima en unos 6000 °C, su vida media es de minutos y su tamaño, de centenares de kilómetros.

En la superficie solar se distinguen también unas manchas oscuras. Se conocen desde la antigüedad y fueron asociadas definitivamente a la superficie solar por Galileo en el siglo XVII. Estas manchas pueden tener un diámetro como el de la Tierra. Tienen una zona central más oscura (umbra) rodeada por una estructura de filamentos claros y oscuros (penumbra). Esta oscuridad se debe a que su temperatura, de unos 4000 °C en la umbra, es menor que la media de la superficie. Se trata de una oscuridad relativa, ya que su luminosidad es mayor que la reflejada por la luna llena. De las manchas solares emergen intensos campos magnéticos que pueden derivar en erupciones solares, en ocasiones acompañadas de eyección de masa solar.

Por encima de la fotosfera se encuentran la cromosfera y la corona. Ambas son de baja densidad y alta temperatura, a consecuencia de la elevada velocidad de pocas partículas. La cromosfera, con una altitud de miles de kilómetros, se puede observar con filtros especiales o durante los eclipses, con su tono rojizo característico. La corona, con una altitud del orden del millón de kilómetros, solo se puede observar durante los eclipses o desde el espacio tapando el Sol con un disco. Está formada por gases completamente ionizados expulsados por las ondas de choque de las erupciones. El espectro electromagnético que emite es también complejo, con una importante presencia de rayos X. En los

próximos años, se prevén importantes avances en la comprensión de su dinámica, cuando los científicos dispongan de instrumentos con capacidad para estudiar todo el espectro.

El viento solar, una brisa arrolladora

El Sol emite constantemente un flujo de partículas cargadas eléctricamente que constituyen el llamado *viento solar*. Se trata de partículas de la corona que consiguen escapar de la gravedad solar por su elevada velocidad. Básicamente son electrones, protones y trazas de núcleos de helio. Este fenómeno es el causante de las auroras boreales y de que las colas de los cometas apunten en sentido contrario al Sol. Con el viento solar se extiende el campo magnético, cuyas líneas presentan forma de espiral en las inmediaciones del Sol debido a su rotación. Su región de influencia, la heliosfera, se extiende más allá de las órbitas planetarias, hasta más de cien veces la distancia a la Tierra. Solamente algunos cometas salen de esta región, exponiéndose al medio interestelar.

El viento solar no es homogéneo y ocasionalmente puede tener perturbaciones de dimensión variable según la magnitud de las erupciones que las causen. Estas perturbaciones pueden ser muy violentas e ir acompañadas de eyección de masa coronal. En los periodos de máxima actividad solar pueden incluso afectar temporalmente a la magnetosfera terrestre, ocasionando lo que se conoce como *tormenta solar*.

Las tormentas solares más potentes son capaces de provocar caídas del suministro eléctrico, interferencias en las telecomunicaciones o desactivar satélites. Una de las más importantes tuvo lugar en 1859 e inutilizó gran parte de las líneas telegráficas de Estados Unidos y Europa. Fue tan intensa que se llegaron a ver auroras boreales desde el Caribe y Hawái. Otra muy conocida se produjo en 1989 en Canadá y provocó un apagón que afectó a millones de personas. Actualmente la actividad solar es constantemente monitorizada para intentar predecir estos episodios.

MAGNETISMO SOLAR

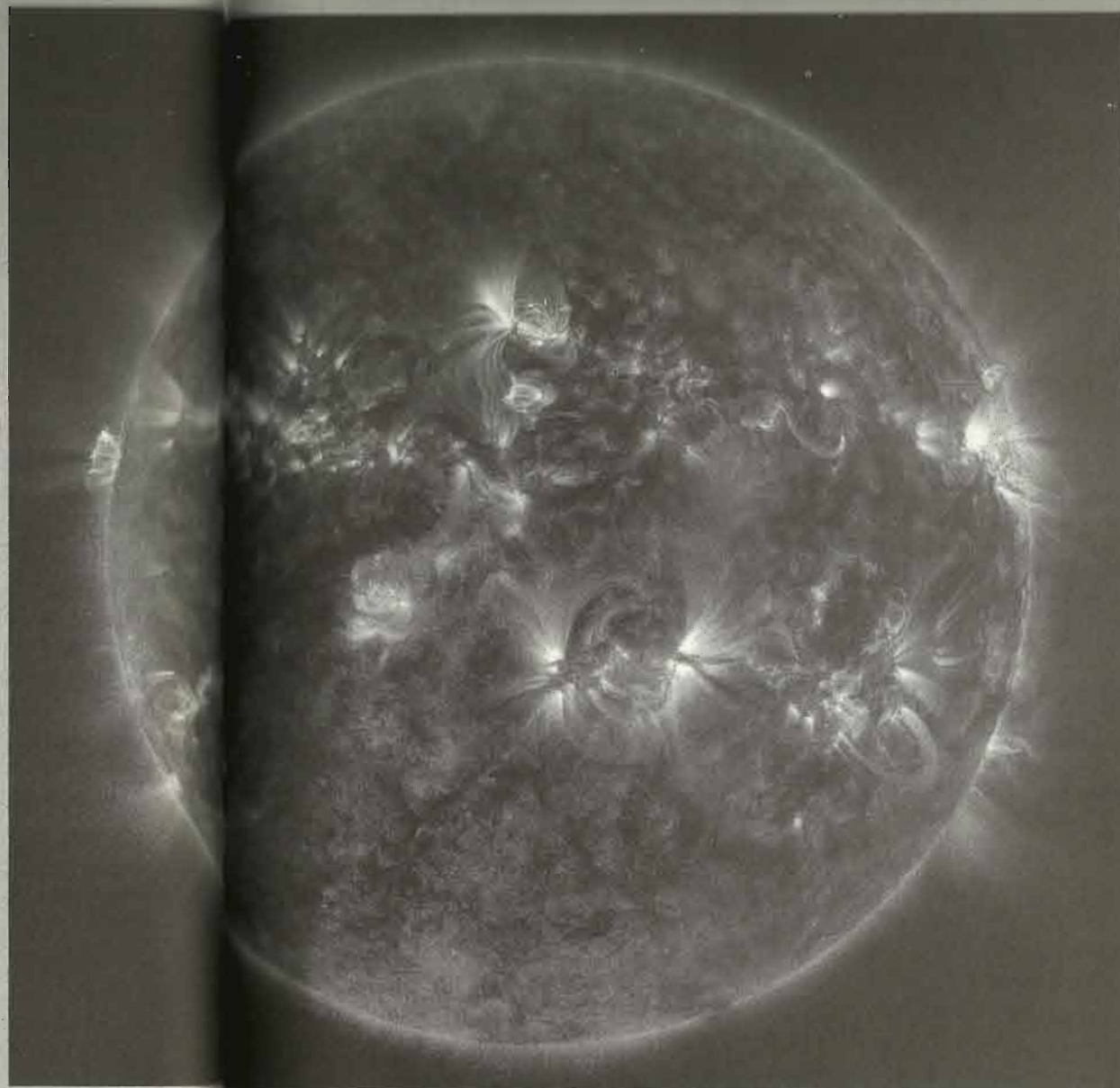
No se conoce bien cuál es el mecanismo exacto por el que se genera el campo magnético solar. Puede que los átomos de helio se acumulen en la parte central en el núcleo, donde se producen las reacciones de fusión, y que los electrones formen una nube a su alrededor. En todo caso, es un campo de extensión limitada, ya que parece no influir mucho más allá de la dinámica superficial. Esta parece fuertemente marcada por campos generados por las corrientes convectivas.

El misterio de las manchas solares

En la superficie, el gas tiende a ordenarse siguiendo líneas de fuerza del campo magnético. Sin embargo, la rotación diferencial de las capas exteriores entre el polo y el ecuador descompensa ese equilibrio. Para restablecerlo se producen rupturas ocasionales en la continuidad del campo, que se manifiestan en forma de las conocidas manchas solares, acompañadas de erupciones. El observatorio SDO (*Solar Dynamics Observatory*), lanzado en 2010, ha captado espectaculares vídeos sobre estos fenómenos. La descompensación provocada por la rotación diferencial va aumentando a la vez que las rupturas, hasta que finalmente se llega a un punto de máximo desorden. Es lo que se conoce como *máximo solar*. En este punto se multiplica el número de manchas solares, siendo la época más propicia para las tormentas solares. Este fenómeno sucede con una periodicidad de 11 años y culmina con un cambio de polaridad solar.



Arriba, gran mancha solar (de color negro) cerca de una erupción solar. A la derecha, vista general del Sol en la que se aprecian múltiples erupciones. Ambas imágenes fueron tomadas por el SDO.

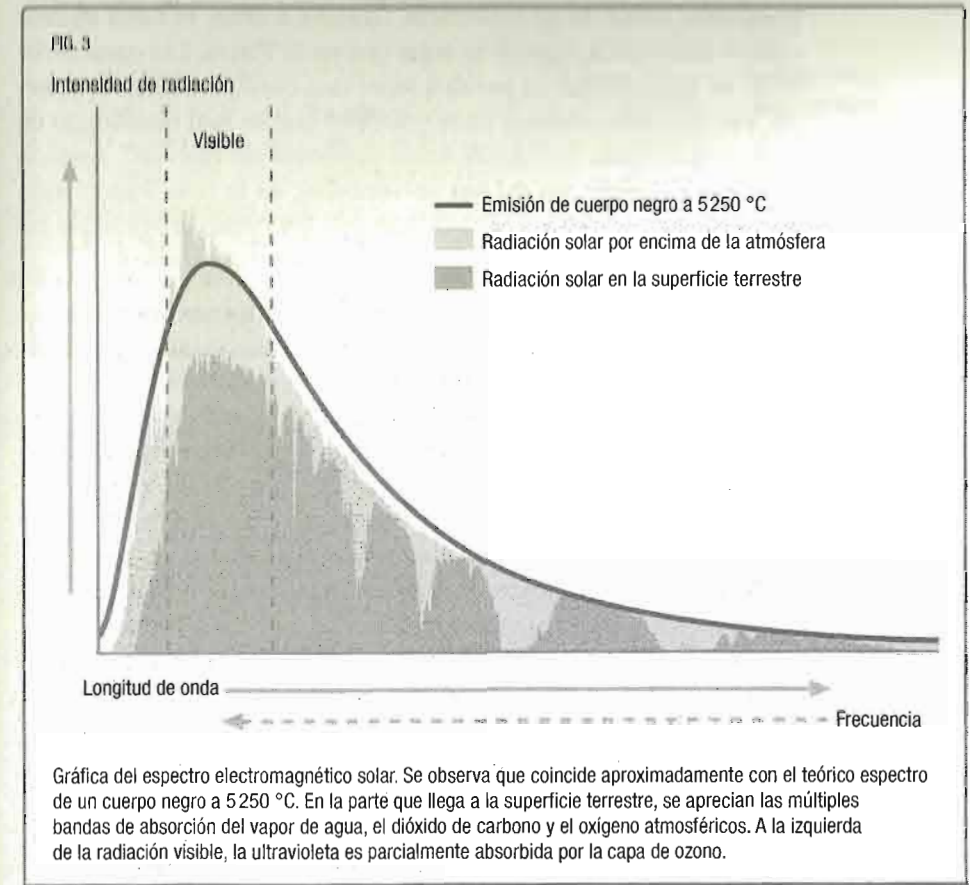


La radiación electromagnética solar: mensajeros de energía

El Sol emite un espectro de ondas electromagnéticas que coincide aproximadamente con el descrito por la teoría de la radiación del cuerpo negro (figura 3). De acuerdo con esta teoría, todos los cuerpos emiten ondas electromagnéticas en distintas frecuencias. Las frecuencias emitidas con máxima intensidad dependen de la temperatura del cuerpo. En el caso del Sol, las intensidades máximas corresponden a aquellas frecuencias que pueden ser percibidas por el ojo humano y que conocemos como *luz*. Esto no es casualidad, de hecho la radiación emitida por el Sol condiciona toda la vida en la Tierra, perfectamente adaptada a su rango. El Sol también emite radiación con menor intensidad en otras frecuencias. La radiación ultravioleta, con mayor frecuencia y menor longitud de onda que la radiación visible, interactúa con los átomos y resulta potencialmente peligrosa por afectar la integridad molecular. Afortunadamente es frenada en gran medida por la capa de ozono, sin la cual la vida en la superficie terrestre sería casi imposible. La radiación infrarroja, con menor frecuencia y mayor longitud de onda que la radiación visible, interactúa con las moléculas aumentando su velocidad y generando calor.

La radiación electromagnética solar no solo modela el clima y la geología de la Tierra, sino también los ciclos de los seres vivos que la habitan. Las plantas obtienen su energía directamente de ella mediante el proceso de fotosíntesis. Esta energía pasa a los herbívoros, posteriormente a los carnívoros y, finalmente, al ser humano, al final de la cadena alimentaria. De forma más indirecta, gran parte de la energía que utilizamos para desarrollar nuestras actividades también proviene del Sol. Las energías renovables propias de la dinámica atmosférica, como la hidroeléctrica y la eólica, están relacionadas con el calor generado por la radiación solar. Incluso la energía de los combustibles fósiles es energía solar acumulada.

Al igual que el Sol, todas las estrellas emiten radiación electromagnética, cuyo espectro se utiliza para catalogarlas. Hoy en día se cuenta con clasificaciones y diagramas para, a partir



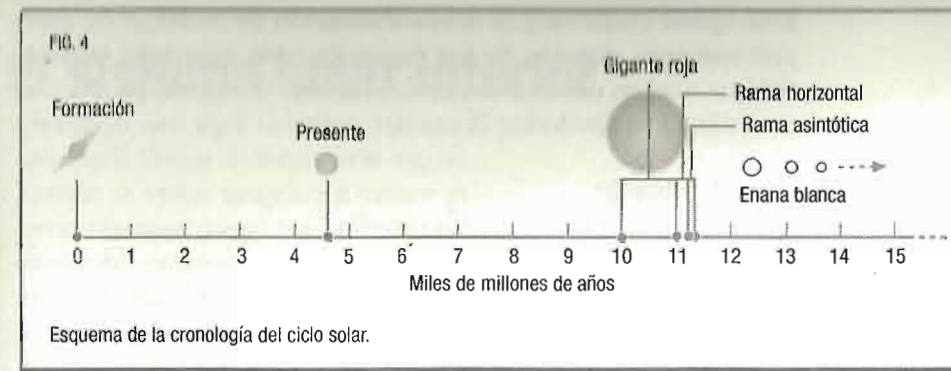
del espectro de una estrella, obtener sus rangos de temperatura, luminosidad, masa y tamaño. La temperatura viene dada de forma bastante directa según la curva de intensidades del espectro. Cuanto más caliente, mayor es la frecuencia con intensidad máxima. Respecto a las otras características, se han necesitado décadas de observación, análisis y medición de paralajes para realizar las clasificaciones. Una de las características clave de los espectros son las bandas espectrales. Son unas bandas de menor intensidad, correspondientes a longitudes de onda que coinciden con los niveles de absorción de los electrones de los elementos

presentes cerca de su superficie. Gracias a ellas, el helio se descubrió antes en la superficie solar que en la Tierra. Las características de las estrellas no pueden tener una configuración cualquiera, sino que responden a unos patrones que se han clasificado en tipos espectrales. La clasificación espectral de Harvard, gestada a finales del siglo XIX en esa universidad, es la más importante. Los tipos espectrales se relacionan con las características de las estrellas mediante los diagramas de Hertzsprung-Russell.

LA MUERTE DEL SISTEMA SOLAR

La suerte del sistema solar va íntimamente relacionada al futuro del Sol. Gracias a infinitud de observaciones sobre estrellas en varios estadios de sus vidas y a un profundo conocimiento de los procesos subatómicos, contamos con modelos que explican la vida entera de una estrella (figura 4). El Sol está catalogado como una enana amarilla en la secuencia principal. Es decir, está en una situación de equilibrio en la que la presión gravitacional resulta compensada por las reacciones de fusión atómica que se dan en su interior. Su situación actual de estabilidad terminará cuando se empiece a agotar el hidrógeno. En el núcleo, esto sucederá dentro de cinco o seis millones de años, y la fusión de hidrógeno continuará solamente en la capa contigua. Al terminar las reacciones de fusión en el núcleo, dejarán de contrarrestar la presión gravitacional. La parte central empezará a contraerse y calentarse, mientras que las capas más externas tenderán a expandirse y enfriarse, convirtiéndose el Sol en una gigante roja. En esta fase su radio aumentará un par de centenares de veces y su luminosidad, un par de miles. La fase de gigante roja será del orden de mil millones de años, más corta que la secuencia principal.

Las siguientes fases serán aún más cortas. Cuando el núcleo haya concentrado una densidad suficiente de átomos de helio procedentes de las capas exteriores, estos se fusionarán en átomos de carbono. Al desplazarse nuevamente la fusión atómica al núcleo, el Sol reducirá su radio hasta alcanzar un tamaño unas diez veces el actual y una luminosidad hasta unas cincuenta ve-



ces la actual. En este punto pasará a ser lo que se llama una estrella de rama horizontal. La fusión del helio del núcleo durará solamente unos cien millones de años. Esto es mucho menos tiempo del que está tardando en fusionar el hidrógeno, ya que los átomos de helio serán menos numerosos y su masa se habrá visto reducida. Cuando se agote el helio del núcleo, los átomos de carbono ya no se fusionarán en átomos más masivos, al no tener el Sol la suficiente masa para proporcionar la densidad necesaria. En las capas contiguas seguirán los procesos de fusión de hidrógeno y helio. El núcleo inerte no podrá contrarrestar la presión gravitacional, y se repetirá el proceso de contracción y expansión de las capas exteriores. En este punto pasará a ser lo que se llama una estrella de rama asintótica. La expansión de las capas exteriores durará unos veinte millones de años y finalizará con una importante pérdida de masa en forma de viento solar. No explotará como una supernova por no tener masa suficiente. En todo caso, la parte no expulsada sufrirá un colapso gravitacional completo, convirtiéndose en una enana blanca. Tendrá una densidad extremadamente alta, con la mitad de la masa original concentrada en una esfera de radio inferior al terrestre. Puede que parte del carbono del núcleo se convierta en diamante. Finalmente, se enfriará durante billones de años, pasando a ser una enana negra.

Las órbitas de los planetas que hayan sobrevivido durante todo el proceso se expandirán por la pérdida de masa del Sol.

Este ajuste conllevará la desestabilización de multitud de cuerpos menores, algunos de los cuales pueden acercarse tanto al Sol que acaben destruidos por sus fuerzas de marea, produciendo anillos a su alrededor. Si nuestro universo llega a un equilibrio

en que ni se expande indefinidamente ni vuelve a colapsar sobre sí mismo, las estrellas que vayan pasando cerca del sistema solar captarán los distintos planetas. De todas formas, el futuro es incierto, ya que la Vía Láctea se fusionará con la galaxia de Andrómeda en varios miles de millones de años. La gran distancia que hay entre las estrellas hace muy poco probable que la integridad del sistema solar se vea afectada. Sin embargo, se intro-

duce una gran incertidumbre por la posible llegada de acontecimientos imprevisibles que puedan modificar el panorama por completo.

En cuanto a la suerte que le espera a la Tierra, existe diversidad de opiniones. Parece claro que Mercurio y Venus serán absorbidos por el Sol cuando se convierta en una gigante roja. Si bien todo indica que el radio solar acabará superando la órbita terrestre actual, también parece que nuestro planeta se encontrará entonces a mayor distancia por la pérdida de masa del Sol. En todo caso, las condiciones para la vida en la Tierra habrán desaparecido mucho antes. Actualmente, la luminosidad solar está aumentando poco a poco y se estima que en centenares de millones de años las temperaturas terrestres se elevarán hasta hacer inviable la vida en la superficie. Quizá se pueda sustentar algún tiempo en el fondo de los océanos, pero estos terminarán evaporándose. Finalmente, la Tierra acabará perdiendo también su atmósfera.

El sistema solar interior

La distancia media de Neptuno al Sol es unas treinta veces la de la Tierra y unas veinte veces la de Marte. Aun siendo relativamente pequeñas, las distancias en el sistema solar interior son enormes. Si el Sol fuera una bola de un metro y medio de diámetro en el centro de un campo de fútbol, la Tierra sería una canica orbitando fuera del estadio, a casi 150 metros.

El componente más brillante de Alfa Centauri [...] es casi el gemelo del Sol en el brillo, masa y tamaño. Si esta Tierra pudiera ser transportada a su vecindad [...] la vida y la civilización podrían seguir sin ningún cambio radical.

HENRY NORRIS RUSSELL

En el sistema solar se pueden distinguir dos regiones claramente diferenciadas. El sistema solar interior está constituido por los cuatro planetas más cercanos al Sol, que son, por orden de proximidad, Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Los otros cuatro constituyen el sistema solar exterior. El sistema solar interior ocupa una región relativamente pequeña en comparación con el exterior. La distancia media de Marte al Sol es una vez y media la terrestre (1,5 UA), mientras que la de Neptuno, el planeta más alejado, es de unas treinta veces (30,1 UA).

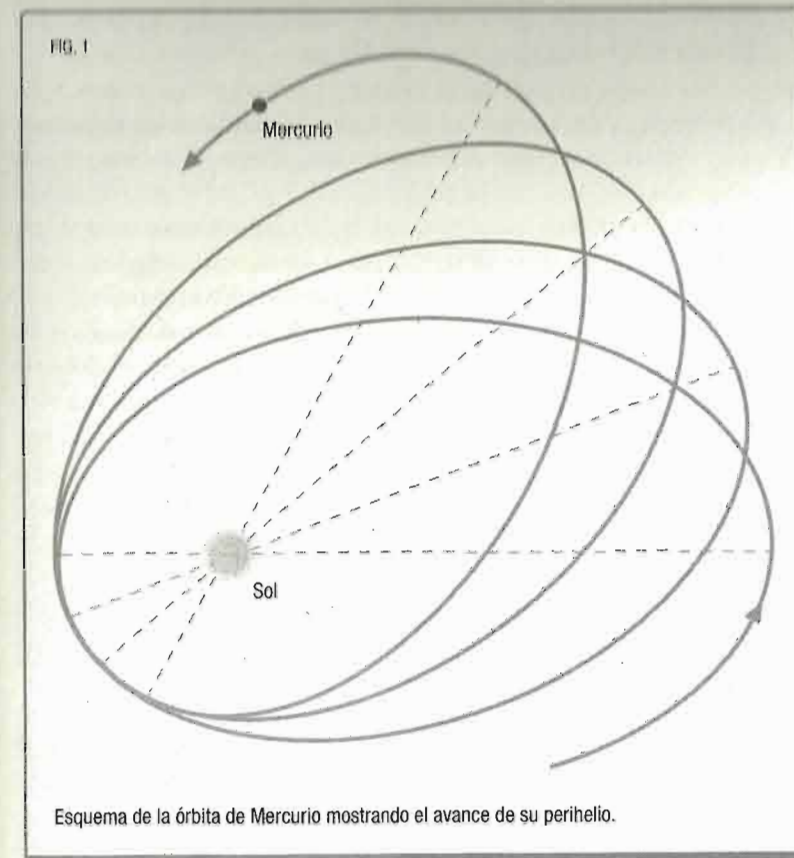
Los planetas del sistema solar interior tienen un tamaño mucho menor que los del exterior. Son básicamente cuerpos rocosos, por lo que se conocen como *planetas terrestres*. Sus densidades son mayores, por lo que la diferencia de masas no es tan grande. Aun así, la masa de la Tierra, el planeta más masivo del sistema solar interior, es 14,5 veces menor que la de Urano, el menos masivo del exterior. Sus porcentajes de masa gaseosa son mucho menores, siendo la atmósfera de Mercurio casi inexistente y la de Marte, muy tenue. La atmósfera de Venus es la más densa, con una presión en superficie unas noventa veces mayor que en la Tierra. Los planetas interiores también se caracterizan

por contar con muy pocos satélites, solo la Luna y dos pequeños cuerpos que orbitan alrededor de Marte.

La Tierra es el más grande y masivo de los cuatro planetas del sistema solar interior. Su característica distintiva más importante es que, hasta hoy, es el único cuerpo en el que se sabe a ciencia cierta que se ha desarrollado la vida. En esto tiene un papel fundamental la gran cantidad de agua líquida que existe en nuestro planeta. De hecho, para definir la zona de habitabilidad en torno a una estrella se usa como criterio si el flujo de radiación emitida permitiría la presencia de agua líquida en la superficie de un cuerpo de tamaño planetario. En el caso de Mercurio, el Sol está demasiado cerca y la excesiva radiación que recibe hace que la temperatura media sea demasiado alta. Venus y Marte están en los límites, habiendo otros factores implicados en la ausencia de agua líquida en su superficie. Los planetas exteriores están demasiado lejos y la escasa radiación que les llega hace que su temperatura media sea demasiado baja.

MERCURIO, ABRASADO POR EL SOL

Es el planeta más cercano al Sol, oscilando su distancia entre 45,9 y 69,7 millones de kilómetros (perihelio y afelio, respectivamente). Su excentricidad orbital, de 20,6%, es la mayor entre los planetas del sistema solar. Tras siglos de observaciones, se sabe que la órbita de Mercurio presenta pequeñas discrepancias con la teoría de la gravedad de Newton. En lugar de dibujar una elipse perfecta como las de Kepler, presenta ligeros avances de su perihelio (figura 1) que sumados resultan en $0,01^\circ$ por siglo. Tras el descubrimiento de Neptuno gracias a las irregularidades en la órbita de Urano a finales del siglo XIX, se formularon hipótesis similares para explicar las irregularidades observadas en la órbita de Mercurio. Durante un tiempo se especuló que también serían debidas a un planeta aún no descubierto, más cercano al Sol. Finalmente, estas irregularidades fueron uno de los primeros fenómenos explicados en el marco de la teoría de la relatividad, ya en el siglo XX. Posteriormente se ha comprobado que



en las órbitas de los otros planetas también hay un avance del perihelio, aunque no tan acusado.

Su plano orbital está inclinado 7° respecto al plano orbital terrestre. La inclinación de su eje de rotación respecto al del plano orbital es casi cero, siendo el planeta con menor inclinación axial. En cuanto a sus periodos, el orbital es de 88 días, mientras que el de rotación es de 57,8 días, lo que supone una resonancia de 2:3, es decir, cada dos órbitas de Mercurio alrededor del Sol, el planeta da tres rotaciones sobre sí mismo. La similitud entre sus periodos orbital y de rotación, junto con la variación de velocidad que supone su gran excentricidad orbital, provocan un

fenómeno único entre los planetas del sistema solar. Se trata del cambio de velocidad aparente del Sol visto desde la superficie, que incluso llega a tener un movimiento retrógrado pocos días antes y después del perihelio. En algunos puntos singulares del planeta, este movimiento retrógrado se manifiesta en forma de un doble amanecer.

Mercurio es el planeta más pequeño y menos masivo del sistema solar. Comparado con la Tierra, su radio es de algo menos del 40% y su masa de algo más del 5%. Tiene la segunda densidad más alta entre los planetas del sistema solar, solo superada por la de la Tierra. Esto puede dar una idea de su composición, que se estima en un 70% de elementos metálicos y un 30% de silicatos. Se cree que su estructura interna consta de núcleo, manto y corteza, al igual que la de la Tierra. Al ser menos masivo, su núcleo está menos comprimido y probablemente contiene una gran cantidad de hierro. Se estima que tiene un radio de aproximadamente un 70% del total, porcentaje mucho mayor que el del núcleo terrestre. Parece ser que está parcialmente fundido, como indican la presencia de un campo magnético y las oscilaciones del eje de rotación detectadas recientemente mediante precisas observaciones desde la Tierra. En cuanto al manto, su grosor es de aproximadamente un 25% del radio total. Para dar explicación a este manto relativamente fino comparado con el de los otros planetas, se propone que en sus orígenes Mercurio sufrió el impacto de un gran cuerpo, que arrancó una parte importante del manto primitivo.

La mayor parte de la información recopilada sobre la superficie de Mercurio se debe a la nave Messenger, que orbitó alrededor del planeta entre 2011 y 2015. Presenta gran cantidad de cráteres de impactos cuyos diámetros oscilan entre unos pocos metros y miles de kilómetros. Su elevado número se debe a que Mercurio apenas posee una atmósfera que frene los meteoritos y erosione las marcas de sus impactos. Muchos se produjeron durante el periodo de bombardeo intenso tardío. El hecho que se hayan mantenido hasta nuestros días indica que apenas existe actividad geológica. Sin embargo, hay indicios de que Mercurio tuvo en el pasado una cierta actividad volcánica. La lava del inte-



Arriba, aspecto de Mercurio según una imagen tomada por la sonda Messenger, en la que se aprecia la abundancia de cráteres en la superficie del planeta. Abajo, tránsito de Mercurio por delante del Sol.

rior del planeta llenó cuencas, formando así llanuras similares a las lunares. También se han detectado multitud de grietas que se extienden miles de kilómetros sobre la superficie cruzando cráteres y llanuras. Parecen indicar tensiones de compresión, por lo que es probable que se hayan formado por el enfriamiento y contracción del planeta. Algunas de ellas podrían estar relacionadas con la flexión que sufre la superficie a causa de las intensas fuerzas de marea generadas por la gran excentricidad de su órbita y su proximidad al Sol.

La tenue atmósfera tiene también otros efectos. Combinada con el largo periodo de rotación y la gran excentricidad de la órbita, provoca un fuerte contraste de temperaturas, con valores máximos y mínimos que superan los 430 °C y los -190 °C, respectivamente. Esta gran amplitud térmica, así como el viento solar y el impacto de micrometeoritos, parecen ser las principales causas de la erosión que se hace evidente en los cráteres más antiguos. A pesar de sus altas temperaturas máximas, datos obtenidos por radar indican que podría existir hielo en el fondo de algunos profundos cráteres en las zonas polares. La atmósfera está ionizada y forma una cola en dirección opuesta al Sol, como los cometas. Se sabe que Mercurio tiene un campo magnético por cómo interactúa con el viento solar. No se conoce su origen, pero se cree que podría estar en un núcleo parcialmente fundido formado por gran cantidad de hierro.

VENUS, EL PLANETA BRUMOSO

Es el segundo planeta más cercano al Sol, oscilando su distancia entre 107,4 y 109 millones de kilómetros (perihelio y afelio, respectivamente). Su excentricidad orbital, de 0,7%, es la menor entre los planetas del sistema solar. Al igual que Mercurio, desde nuestro planeta se ve siempre en las proximidades del Sol, ya que su órbita es más cercana a él. El ángulo Sol-Tierra-Venus es como máximo de 47,8°, por lo que normalmente solo es visible al atardecer y al amanecer. Sin embargo, al ser el planeta que más se acerca a la Tierra y con el mayor coeficiente de reflexión,

ocasionalmente también se puede ver durante el día. De hecho, es el tercer astro más brillante después del Sol y la Luna, con la excepción de meteoritos y cometas puntuales. Probablemente conocido desde la prehistoria, sus movimientos eran ya estudiados por las antiguas civilizaciones. Sus tránsitos entre la Tierra y el Sol permitieron obtener en el siglo XIX las primeras mediciones precisas de las distancias absolutas en el sistema solar.

De todos los planetas del sistema solar, Venus es el que tiene la rotación más lenta, con un periodo de 243 días. Se trata, además, de una rotación retrógrada, es decir, en sentido contrario a la mayoría de los giros que se dan en el sistema solar. Esta rotación tan peculiar podría ser el resultado del impacto de un asteroide. El periodo orbital, de 224,7 días, es muy similar al de rotación, aunque los sentidos de órbita y de rotación son contrarios. Esto provoca que a lo largo de una vuelta completa a su órbita, en vez de presentar prácticamente la misma cara al Sol, tengan lugar 1,9 ciclos día-noche que duran 116,7 días. Venus no es el único planeta con rotación retrógrada, Urano también la tiene, aunque la característica principal de este último es la gran inclinación (97,8°) de su eje de rotación respecto a la perpendicular del plano de órbita. Las inclinaciones se dan teniendo en cuenta el sentido de rotación, por lo que la de Venus es de 177,4°; sin tenerlo en cuenta sería de 2,6°. Como curiosidad, cabe decir que, debido a las peculiaridades de su rotación, cuando se encuentra a la distancia mínima de la Tierra siempre le presenta la misma cara. Este fenómeno podría tener que ver con las fuerzas de marea ejercidas por la gravedad terrestre.

Venus es el segundo planeta más grande y masivo del sistema solar interior, por detrás de la Tierra. Ambos son muy similares en cuanto a tamaño y masa, lo que hace pensar que su composición es también similar. Su densidad, de 5200 kg/m³, ligeramente menor que la terrestre, puede deberse en parte a la menor presión gravitacional. No es sencillo conocer la estructura interna de Venus. Para empezar, su densa atmósfera llena de nubes dificulta la visión y destruye rápidamente las sondas que se envían a su superficie. No se dispone de información sísmica que permita deducir las propiedades de sus distintas capas. Tampoco cuenta

VER LO INVISIBLE: EL RADAR

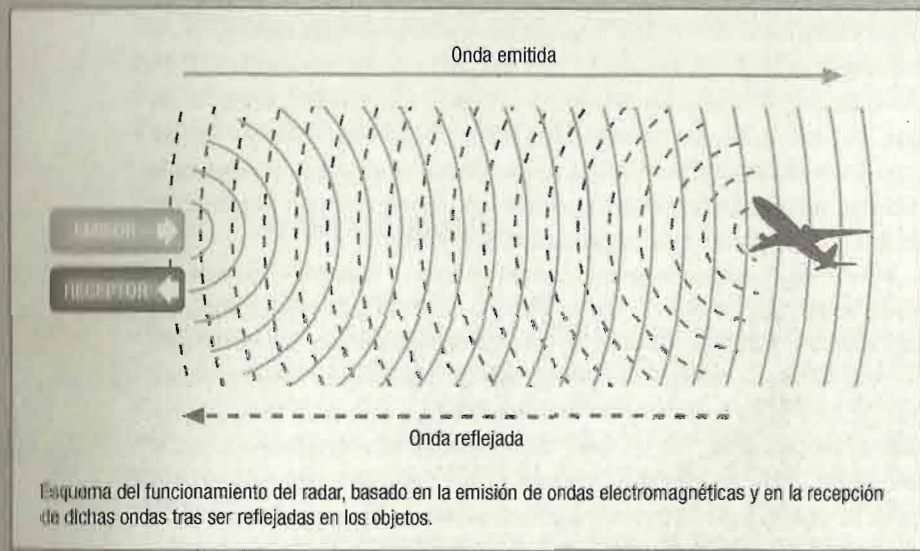
El radar es un sistema para medir distancias y velocidades basado en la emisión de ondas electromagnéticas y su recepción después de ser reflejadas por los objetos. Utilizando frecuencias menores a las de la luz visible, se pueden detectar objetos invisibles o que se hallan en medios que dificultan la visión. Sus aplicaciones no militares incluyen, entre otras, la meteorología y el control del tráfico aéreo.

Los orígenes del radar

Uno de los hitos más importantes en la historia de la ciencia se produjo en la segunda mitad del siglo XX, cuando James Clerk Maxwell formuló su teoría de las ondas electromagnéticas. El primero en enviar y emitir una de estas ondas fue Heinrich Rudolph Hertz a finales de siglo. Poco después aparecieron las primeras empresas que perfeccionaron las técnicas rápidamente. En 1904 se patentó el primer sistema anticofisión de buques. Las guerras mundiales supusieron un impulso definitivo a esta tecnología.

El radar en la exploración espacial

En exploración espacial, el radar se ha utilizado repetidas veces para mapear superficies cuando ha sido imposible obtener información visualmente. Este es el caso de Venus, dada su opaca atmósfera. La primera misión en realizar un mapa topográfico de este planeta utilizando el radar fue la Pioneer Venus en 1978. Recientemente se ha vuelto a utilizar esta técnica para mapear parcialmente Titán, el satélite de Saturno.



A la izquierda, imagen de Venus con la capa de nubes que cubre el planeta, lo que impide ver su superficie. Abajo, representación topográfica de la superficie según las informaciones obtenidas con radar.



con satélites naturales para estudiar sus efectos gravitacionales. Solamente tiene un casi-satélite lejano con una resonancia orbital 1:1, que se puede considerar tanto que orbita a Venus como

Cuando tomamos cierto interés en los grandes descubridores y en sus vidas es cuando la ciencia se hace manejable, y solo cuando comenzamos a rastrear el desarrollo de las ideas se convierte en fascinante.

JAMES CLERK MAXWELL

al Sol. En todo caso, se cree que su estructura interna es similar a la terrestre, con núcleo, manto y corteza. Su núcleo ocuparía una proporción similar al terrestre y estaría también parcialmente fundido. El manto y la superficie también tendrían proporciones similares, aunque es posible que tengan una menor presencia de agua. Esta sequedad explicaría la ausencia de placas tectónicas.

En cuanto a la superficie, los pocos cráteres que se pueden encontrar tienen un diámetro mínimo de 3 km, ya que los meteoritos más pequeños son desintegrados por la densa atmósfera. El 90% de la superficie está cubierta por silicatos y existen en ella más estructuras volcánicas que en cualquier otro planeta. Por la densidad de estas estructuras, se estima que pudo haber sufrido un gran impacto centenares de millones de años atrás. Esto podría explicar también su rotación retrógrada. En cuanto a su relieve general, existen dos grandes mesetas elevadas sobre una extensa llanura. En el hemisferio sur, Aphrodite Terra, con un tamaño similar al de Sudamérica. En el hemisferio norte, Ishtar Terra, con un tamaño similar al de Australia y donde se encuentra el macizo montañoso más alto del planeta. El Maxwell Montes fue confirmado como el lugar más elevado de la superficie de Venus gracias al primer mapa topográfico realizado con radar en 1978.

Si bien se cree que su composición y estructura interna son similares a las terrestres, se sabe que su atmósfera es totalmente distinta. Es el planeta del sistema solar interior con una atmósfera más densa. Su presión en la superficie es unas noventa veces mayor que la de la Tierra, lo que equivale en nuestro planeta a la presión a 900 m de profundidad bajo el nivel del mar. Está formada básicamente por dióxido de carbono, algo de nitrógeno y tra-

zas de ácido sulfúrico que componen las nubes. Estas reflejan al espacio la mayor parte de la radiación solar recibida, lo que hace la superficie de Venus más oscura que la terrestre. La radiación que atraviesa las nubes se conserva en forma de calor debido a un intenso efecto invernadero, que lo convierte en el planeta más caliente del sistema solar. Su temperatura media en la superficie, de unos 464 °C, apenas varía en el ciclo día-noche, una estabilidad sorprendente teniendo en cuenta que este ciclo dura más de cien días. Esto es debido a la gran inercia térmica de la atmósfera y al transporte del calor por los fuertes vientos. En la atmósfera superior, los vientos pueden circunvalar la atmósfera en cuatro días, llevando consigo las nubes que cubren el planeta. De hecho, antes de enviar sondas a Venus, se creía que ese era su periodo de rotación. Aparte del movimiento de circunvalación, existen también movimientos entre el ecuador y los polos en forma de células de circulación convectivas similares a las de la atmósfera terrestre. Las turbulencias pueden ser importantes, habiendo sufrido los globos sonda Vega caídas de hasta tres kilómetros. Al nivel del suelo los vientos no son tan violentos como en las capas altas, pero la elevada presión hace que su fuerza sea considerable.

Su campo magnético es muy débil si lo comparamos con el terrestre, posiblemente debido a su lenta rotación. Su débil magnetosfera apenas protege al planeta del viento solar, lo que habría supuesto la desaparición del agua de su superficie. El vapor de agua se habría disociado en hidrógeno y oxígeno, escapando el primero al espacio y permaneciendo el segundo en la atmósfera en forma de dióxido de carbono. El porcentaje de deuterio (isótopo masivo del hidrógeno), que no escapa con tanta facilidad, parece indicar que en algún momento pudo tener una cantidad de agua tan importante como la Tierra.

LA TIERRA, CRISOL DE LA VIDA

Es el tercer planeta más cercano al Sol, oscilando su distancia entre 147,1 y 152,1 millones de kilómetros (perihelio y afelio, respectivamente). Su excentricidad orbital, de 1,7%, es de las más

bajas. Normalmente, el plano de la órbita terrestre se toma como referencia para dar las inclinaciones orbitales de los demás planetas. Sin embargo, algunas veces se usa también el plano invariable que pasa por el centro de masas del sistema solar y es perpendicular a su momento angular. Determinado casi exclusivamente por los planetas del sistema solar exterior, su inclinación respecto al plano orbital de la Tierra es de $1,6^\circ$.

El periodo orbital terrestre, de 365,26 días, es lo que llamamos *año*. En cambio, su periodo de rotación, de 23,9 horas, no es lo que conocemos como *día*. La palabra *día* acostumbra a referirse al ciclo día-noche medio de la Tierra. Una *hora* corresponde a una veinticuatroava parte de un día. Con 24 horas, el día es algo más largo que el periodo de rotación, ya que la posición relativa del Sol visto desde la Tierra se desplaza diariamente respecto a la de las estrellas debido al movimiento orbital. Tanto el movimiento orbital como la rotación siguen sentido antihorario vistos desde el polo norte. De esta forma, los cuerpos celestes observados desde la Tierra tienen un movimiento relativo hacia el oeste. El correspondiente a la rotación es de unos 15° /hora. Por otro lado, la inclinación axial es de $23,4^\circ$, siendo la sucesión de las estaciones una de sus principales consecuencias.

La Tierra es el planeta más grande del sistema solar interior y también el más masivo, al ser su densidad de 5500 kg/m^3 , la mayor de todos los planetas del sistema solar. Su circunferencia media es de 40 000 km exactos, ya que el metro fue originalmente definido como la diezmillonésima parte de la distancia del ecuador al polo norte. Sus radios ecuatorial y polar, de 6378 km y 6357 km, respectivamente, difieren a causa del achatamiento provocado por su rotación y las fuerzas de marea. En cuanto a su masa, es de aproximadamente $6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, unas trescientas mil veces menor que la masa solar. Se estima que nuestro planeta está formado por un 32,1% de hierro, un 30,1% de oxígeno, un 15,1% de silicio y un 13,9% de magnesio, además de cantidades menores de azufre, calcio, aluminio y muchos otros elementos. La temperatura interna aumenta con la profundidad, llegando a alcanzar valores mayores que en la superficie solar. Una pequeña

parte de este calor se acumuló durante el proceso de formación. El resto es el resultado de procesos de fisión atómica, básicamente de isótopos de uranio, torio y potasio.

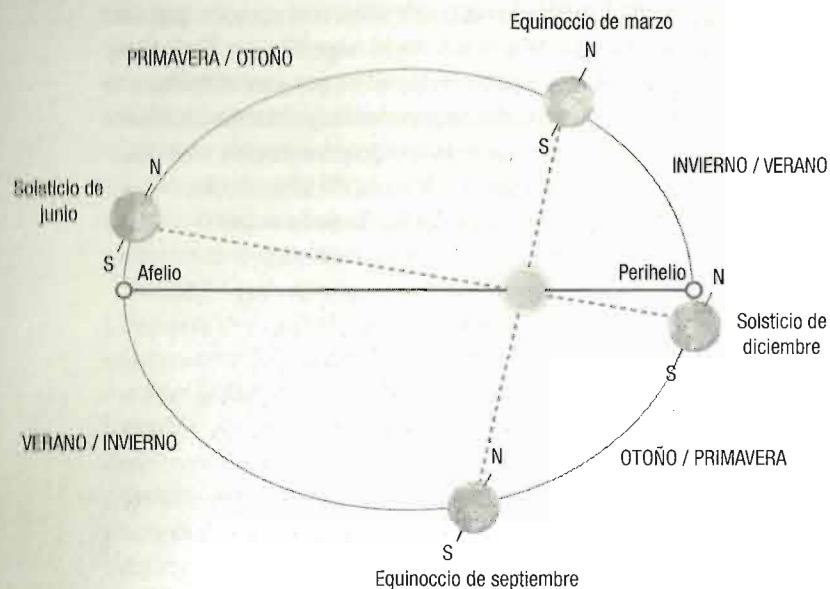
La estructura interna de la Tierra es la mejor conocida de todos los planetas. Gracias al estudio de cómo llegan las ondas sísmicas de un terremoto a todos los sismógrafos del planeta, se tiene una idea de su estructura de capas y sus propiedades. El núcleo tiene unos 3500 km de radio y se cree que está formado básicamente por hierro, además de pequeños porcentajes de níquel y azufre. Se pueden distinguir en él dos zonas claramente diferenciadas. El núcleo interno tiene unos 1250 km de radio, es sólido y su velocidad de rotación es ligeramente superior a la del resto del planeta. El núcleo externo está parcialmente fundido y se cree que aloja las corrientes de convección causantes del campo magnético terrestre. Por encima se encuentra el manto, que se extiende hasta unos pocos kilómetros de la superficie y está formado por óxidos de silicio y magnesio. En él se pueden distinguir también dos partes, entre las cuales existe un importante cambio en la estructura cristalina: el manto inferior, con mayor viscosidad, y el manto superior, más rígido. La zona de transición entre ambos está situada entre unos 400 y 650 km bajo la superficie. La capa más externa de la Tierra es la corteza, que está compuesta básicamente por silicatos. Su espesor puede variar entre 5 km en los océanos y 70 km en las partes más gruesas de los continentes.

La parte superior del manto y la corteza, aunque distintos químicamente, forman la llamada litosfera, que está dividida en varios fragmentos móviles denominados placas tectónicas. Estas se deslizan por efecto de las corrientes de convección del manto inferior, generadas al trasladarse hacia la superficie la energía térmica del núcleo. Parte de este calor termina escapando por las juntas entre las placas y por las finas capas de la corteza oceánica. En los márgenes de las placas se concentra la actividad volcánica y sísmica. Según si se juntan, se separan o se deslizan lateralmente, los márgenes son convergentes, divergentes o transformantes, respectivamente.

La existencia de placas tectónicas móviles en la Tierra supone una singularidad dentro del sistema solar, siendo su dinámica

CAMBIOS DE ESTACIÓN

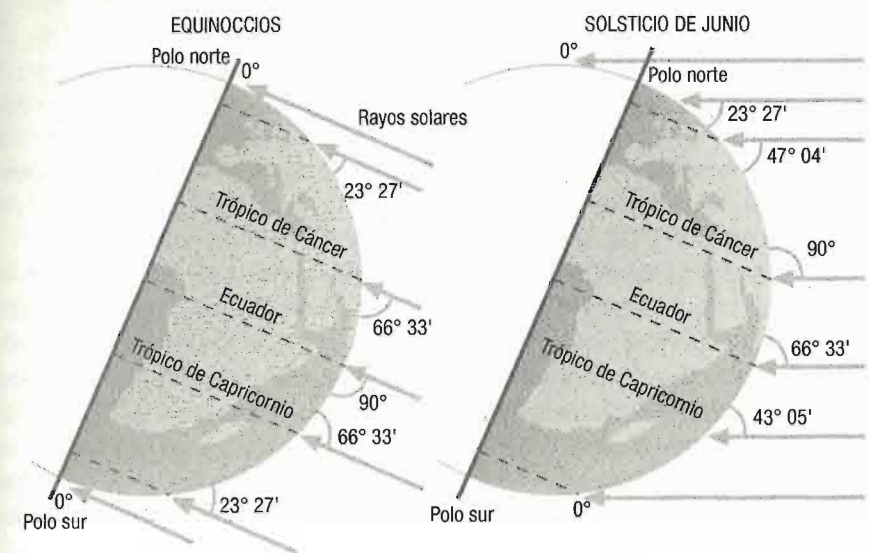
A lo largo de un año, el eje de rotación terrestre se mantiene en la misma dirección y solo coincide dos veces con el plano del terminador solar (la línea que separa las partes iluminada y en sombra de la Tierra). Cuando eso sucede, las horas diurnas y nocturnas están repartidas equitativamente en ambos hemisferios. Estos eventos son llamados *equinoccios* y dividen el año en dos mitades. En una de ellas, el hemisferio norte tiene más horas diurnas que nocturnas, y viceversa. La diferencia máxima entre horas diurnas y nocturnas se produce cuando el eje de rotación alcanza la máxima inclinación respecto al plano del terminador solar. Estos eventos son llamados *solsticios*. En el hemisferio norte, cuando se da el máximo de horas diurnas es el solsticio de verano (21 de junio) y cuando son mínimas es el de invierno (21 de diciembre). En cuanto a los equinoccios, si las horas diurnas están en proceso de disminución es el equinoccio de otoño (23 de septiembre), y si están aumentando es el de primavera (20 de marzo). Los cuatro marcan el inicio de sendas estaciones en dicho hemisferio; sucede lo mismo de forma simétrica para el hemisferio sur.



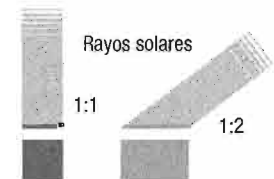
Esquema de la sucesión de las estaciones en los hemisferios norte y sur. Se pueden ver las posiciones de la Tierra en los solsticios y equinoccios, así como el eje mayor de la órbita, donde se marcan el perihelio y el afelio. El solsticio de diciembre tiene lugar poco antes del perihelio.

Radiación solar y temperaturas

La variación de la temperatura que se produce como consecuencia del mayor o menor número de horas diurnas se ve acrecentada por el flujo de radiación solar recibida debido a la inclinación del eje de rotación terrestre. Cada hemisferio recibe un mayor flujo de radiación en sus respectivos primavera y verano. La única asimetría en cuanto a la cantidad total de radiación recibida por cada hemisferio se debe a la excentricidad orbital. En la actualidad, el perihelio (3 de enero) coincide aproximadamente con el solsticio de diciembre (solsticio de invierno en el hemisferio norte y de verano en el hemisferio sur). Como en el perihelio se recibe un 6,9% más de radiación que en el afelio, el hemisferio sur recibe algo más de radiación a lo largo del año. No obstante, los efectos de esta asimetría se pueden considerar despreciables frente a los que provoca la asimetría en la distribución de continentes y océanos. Además, existen otros factores que influyen en las temperaturas, como la altitud y la dirección y la fuerza de los vientos.



En los equinoccios, los rayos solares llegan perpendiculares al Ecuador. En los trópicos de Cáncer y de Capricornio, esta situación se da en los solsticios de junio y diciembre, respectivamente. Debido a la inclinación del eje terrestre, más allá de estas latitudes la radiación solar nunca alcanza los 90°. La radiación perpendicular es más eficaz, al distribuir su energía por una superficie menor.



la responsable de la orografía terrestre. La corteza tiene un ciclo de renovación que casi ha borrado por completo los impactos de meteoritos que ha recibido nuestro planeta. Esta renovación se produce por la subducción de parte de la corteza en los márgenes convergentes y el afloramiento de nueva corteza en los márgenes divergentes (figura 2). Gran parte de estos procesos tienen

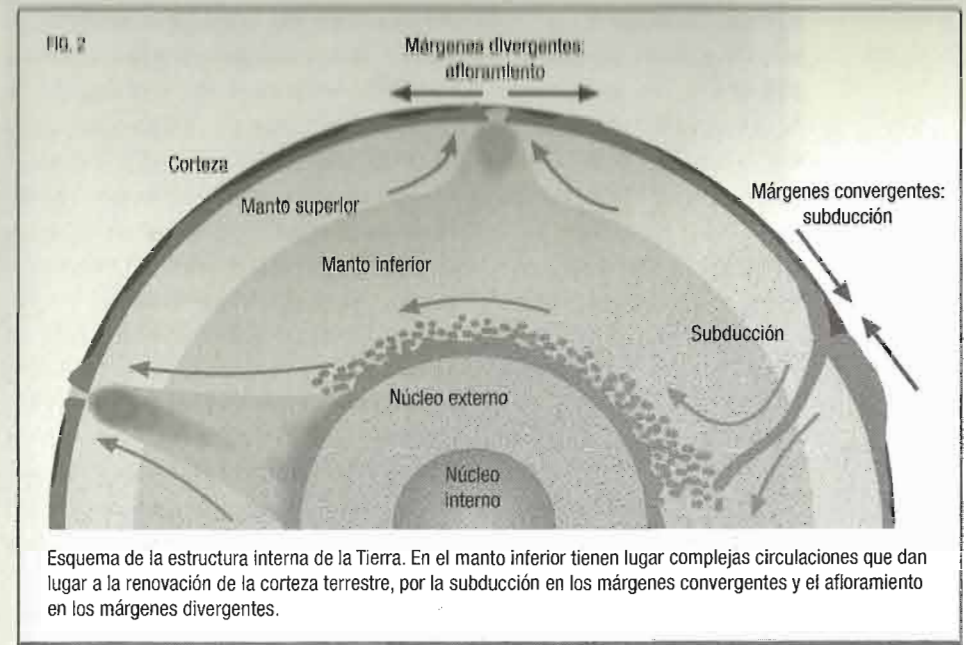
El océano envuelve la Tierra y llena sus abismos más profundos.

NICOLÁS COPÉRNICO

lugar bajo el agua, que cubre el 70,8% de la superficie terrestre. El lugar más profundo de la superficie se encuentra a unos 11 km bajo el nivel del mar en la fosa de las Marianas, en el océano Índico, en una zona de subducción. En

la parte central de las placas se hallan las dorsales oceánicas, por donde aflora la nueva corteza, al ser menos densa que el manto. Esta sobresale por encima del mar una media de unos 840 m. El punto más elevado de la superficie terrestre se encuentra a unos 9 km sobre el nivel del mar, en la cordillera del Himalaya, que surgió por la colisión de dos placas tectónicas. La dinámica de las placas tiene también un papel importante en la renovación atmosférica, siendo las dorsales oceánicas la principal fuente natural de emisión de gases, básicamente dióxido de carbono.

La hidrosfera es la capa constituida por toda el agua que se encuentra sobre o bajo la superficie de la Tierra. La mayor parte está en los océanos y mares, donde juega un importante papel en la moderación del clima absorbiendo y liberando calor. Las sales y gases que lleva disueltas han tenido y tienen un papel fundamental en el desarrollo de la vida. El resto del agua se localiza en lagos, ríos y acuíferos. De toda el agua de la hidrosfera, solo un 2,5% es agua dulce, de la que dos terceras partes se encuentran en forma de hielo en las zonas polares. En los últimos millones de años se vienen produciendo glaciaciones con una periodicidad de entre cuarenta mil y cien mil años, que conllevan la acumulación de mayores masas de hielo en zonas más extensas alrededor de los polos. Actualmente nos encontramos en un periodo interglaciar. En cualquier caso, la mayor parte del agua se halla siempre en estado líquido en los océanos, donde no permanece estática sino que sigue un ciclo: se evapora y es transportada por la



circulación atmosférica, y cuando se enfría, condensa y precipita. La mayor parte vuelve al océano, ya sea directamente o a través de los sistemas fluviales. La erosión combinada de la lluvia y el viento modela el relieve de la superficie terrestre, provocando su descomposición en granos que se acumulan y forman el suelo. La precipitación de agua en este suelo es vital para la vida vegetal.

La atmósfera terrestre es suficientemente densa para proteger al planeta de los meteoritos más pequeños. Su composición en volumen es de un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y trazas de otros gases como vapor de agua y dióxido de carbono. El oxígeno es vital para el ser humano y su presencia en la atmósfera se explica por procesos biológicos cuyas raíces se remontan miles de millones de años atrás. El vapor de agua y el dióxido de carbono, aunque presentes en pequeñas cantidades, son también esenciales en la conservación del calor por el efecto invernadero. La atmósfera se puede dividir en distintas capas. La más próxima a la superficie es la troposfera, que, con unos diez kilómetros de

grosor, constituye las tres cuartas partes de la masa atmosférica total. La presión al nivel del mar es de aproximadamente cien mil pascales y equivale a la ejercida por unos diez metros de agua. En la troposfera tienen lugar la mayor parte de los fenómenos meteorológicos asociados a las corrientes de convección provocadas por la radiación solar. Esta atraviesa la atmósfera y alcanza la superficie, que se calienta, calentando a su vez el aire cercano, que asciende y es sustituido por aire más frío. Estas corrientes ocurren de forma local y también de forma global, originando células de circulación en bandas paralelas desde el ecuador hasta los polos. La proximidad al ecuador, donde el flujo de radiación es mayor, determina el clima, que es más frío cuanto más nos acercamos a los polos. La temperatura media de la atmósfera en la superficie se estima en unos 15 °C. La atmósfera superior se puede subdividir en varias capas. La inferior es la estratosfera, donde se encuentra la capa de ozono, que filtra la radiación ultravioleta y permite la vida fuera del agua. Por encima están la mesosfera, cuya temperatura sigue disminuyendo con la altitud, y la termosfera, cuya temperatura aumenta con la altitud. Este aumento de temperatura es debido a la absorción de las altas frecuencias de radiación solar, que provocan la ionización de algunas moléculas en la capa conocida como ionosfera. Finalmente, la exosfera se atenúa hasta desvanecerse. Se considera que la atmósfera termina y el espacio exterior empieza a los 100 km de altitud. Algunas moléculas se pierden en el espacio, sobre todo las de hidrógeno, más ligeras. Afortunadamente, en la atmósfera actual, rica en oxígeno, la mayor parte del hidrógeno forma agua antes de tener la ocasión de escapar.

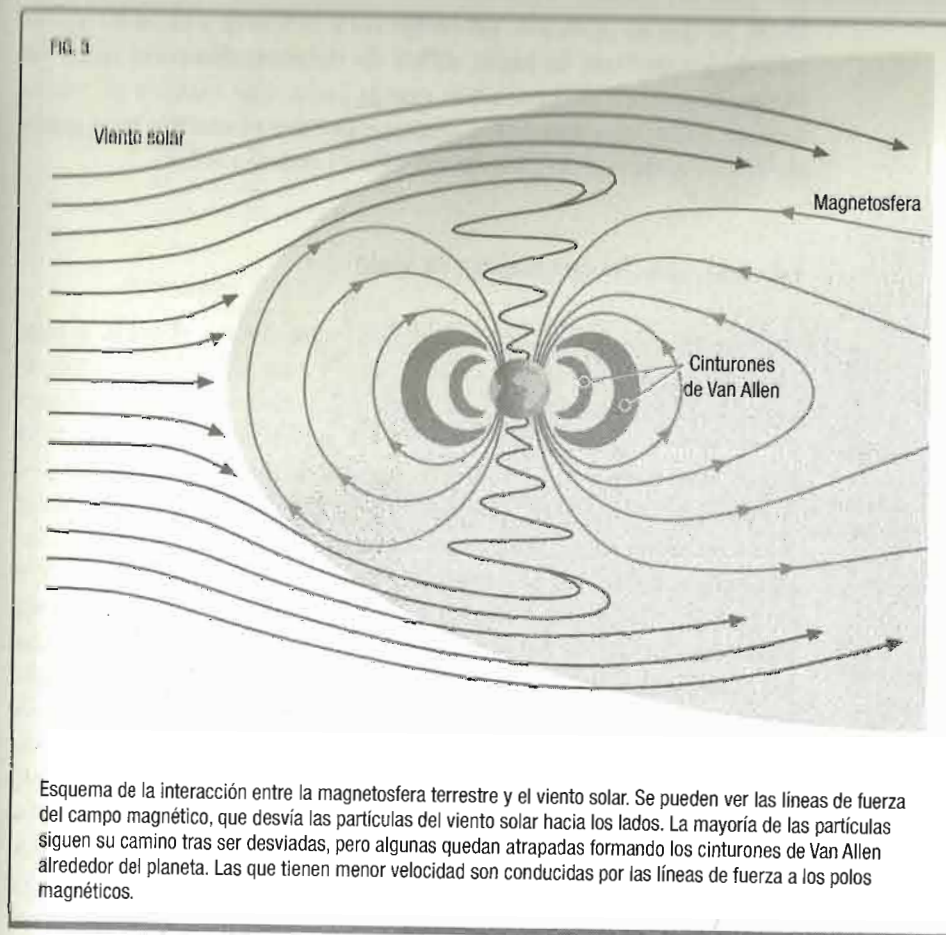
La característica de la Tierra sin duda más destacable para nosotros es que, por el momento, es el único planeta en el que sabemos con certeza que se ha desarrollado la vida. Esta ha evolucionado sustancialmente, introduciendo además importantes cambios en las características terrestres. Se estima que las primeras moléculas autorreplicantes aparecieron hace unos cuatro mil millones de años. Las sucedieron organismos unicelulares, algunos de los cuales desarrollaron la fotosíntesis para almacenar y reutilizar la energía solar. Las versiones más evolucionadas



Arriba, imagen de la Tierra tomada por la tripulación de la misión Apolo 17. Las cianobacterias (abajo) fueron los primeros organismos que desarrollaron la llamada fotosíntesis oxigénica y las responsables de la acumulación de oxígeno en la atmósfera terrestre primitiva.

dieron lugar a la acumulación de oxígeno en la atmósfera y la posterior formación de la capa de ozono, que filtra la radiación ultravioleta. Estos acontecimientos posibilitaron la evolución de organismos pluricelulares cada vez más complejos. Tras varias extinciones masivas en los últimos centenares de millones de años, la vida se ha abierto camino diversificándose cada vez más. La última extinción masiva tuvo lugar hace 65 millones de años, probablemente causada por el impacto de un meteorito. Sea como fuere, en ella se extinguieron los dinosaurios, lo que favoreció la evolución de los pequeños mamíferos, a partir de los que se desarrolló el *Homo sapiens*. Nuestra especie habita la Tierra desde hace menos de doscientos mil años. Toda la evolución biológica ha sido posible gracias a una atmósfera que conserva el calor y a la presencia de agua líquida en superficie. Si no sucede ningún cataclismo astronómico, se prevé que las condiciones para la existencia de vida en la Tierra se mantengan durante centenares de millones de años, hasta que el aumento de la radiación emitida por el Sol la haga inviable.

La Tierra es el planeta del sistema solar interior con un campo magnético más fuerte. El planeta entero se comporta como un gran imán, coincidiendo aproximadamente sus polos magnéticos con sus polos de rotación. La región de influencia de este campo es la *magnetosfera*, cuyo límite es moldeado por la acción del viento solar (figura 3). En dirección al Sol, la onda de choque está a una distancia de unas trece veces el radio de la Tierra. En dirección contraria, su cola se extiende mucho más allá. La magnetosfera protege al planeta del viento solar, que solamente puede penetrar por los polos magnéticos, generando las espectaculares auroras boreales. Se cree que el campo magnético está causado por corrientes de convección en el núcleo externo, parcialmente fundido y formado por gran cantidad de hierro. En el seno de este material altamente conductor se producen las corrientes eléctricas que son el origen del campo magnético terrestre. La dinámica de estas corrientes no está exenta de cierto caos, lo que provoca pequeños desplazamientos de los polos magnéticos. Varias veces cada millón de años, incluso se invierte completamente su posición. Estos cambios de polaridad se descubrieron gracias a



que el campo magnético marca la orientación de ciertos óxidos metálicos durante la formación de los fondos oceánicos. En la actualidad se puede comprobar que estas orientaciones cambian de sentido a diferentes distancias de la dorsal.

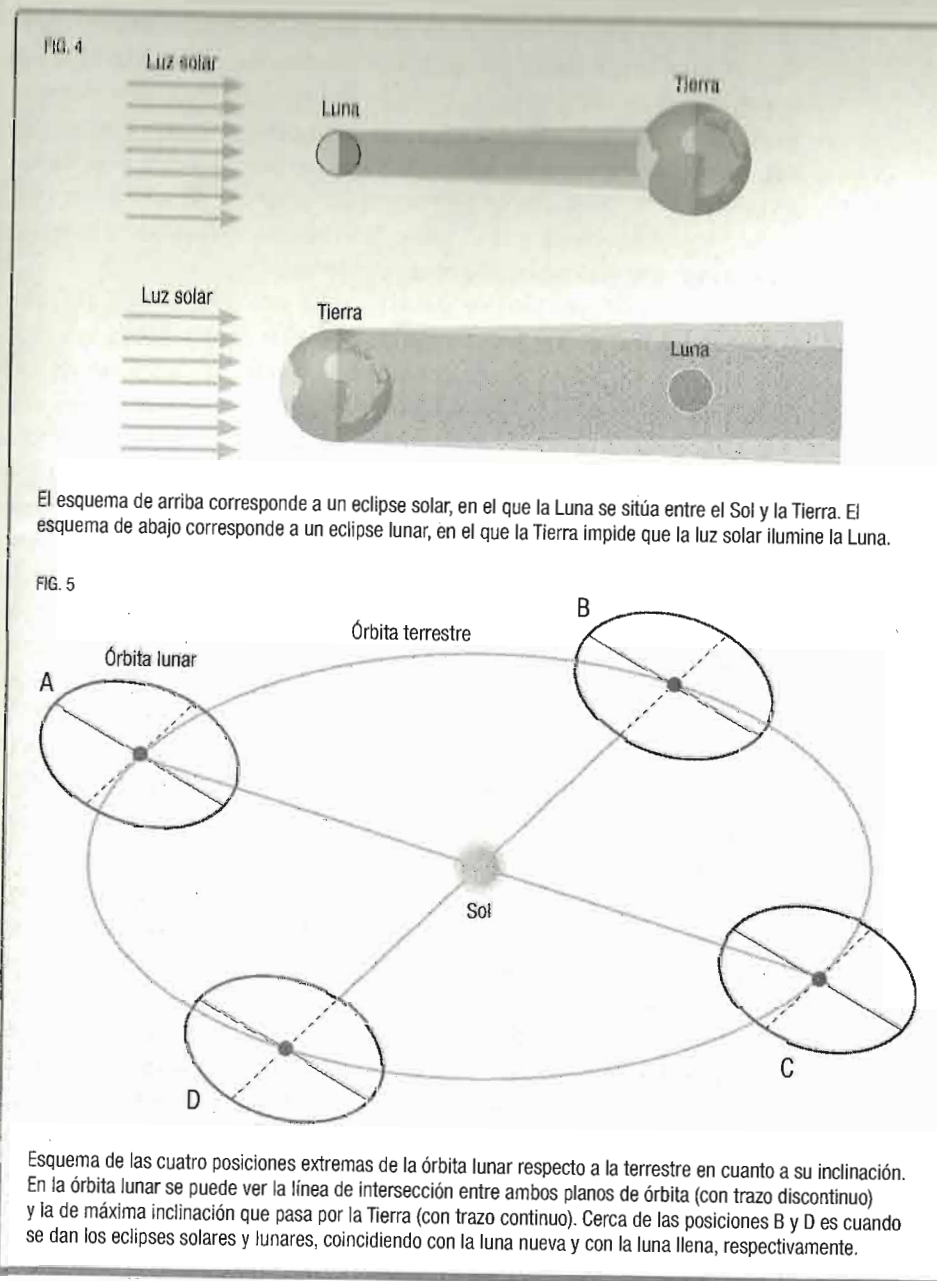
La Tierra tiene un único satélite, la Luna, que sería el único del sistema solar interior si no fuera por dos pequeños cuerpos que orbitan alrededor de Marte. Recientemente se ha detectado también al menos un pequeño asteroide que comparte órbita con la Tierra, lo que se conoce como un *troyano*. No se descubrió hasta

2010, ya que su posición, precediendo a la Tierra a unos 80 millones de kilómetros, lo hacía difícil de detectar. En todo caso, es insignificante en comparación con la Luna, que merece un tratamiento especial, entre otras razones, por ser el satélite más grande en relación con su planeta de todo el sistema solar.

La Luna, una fiel compañera de viaje

Se mueve alrededor de la Tierra en una órbita situada a una distancia media de unos 384 000 km y con un 5,5% de excentricidad. Su periodo orbital es de 27,3 días, aunque teniendo en cuenta el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, el ciclo lunar percibido desde nuestro planeta es de 29,5 días. Este periodo es exactamente igual que el de rotación, estando ambos sincronizados de tal forma que la Luna siempre presenta la misma cara a la Tierra. Las mínimas variaciones en la orientación de la cara visible se deben a la inclinación axial de $6,7^\circ$ en su rotación. Desde la Tierra, se pueden ver en la Luna fases de luz y sombras, ya que la parte iluminada por la luz solar cambia durante su periodo orbital. Cuando se encuentra en el lado opuesto al Sol, la vemos totalmente iluminada en lo que se conoce como luna llena. Cuando está en el mismo lado que el Sol, simplemente no aparece en el cielo nocturno en lo que se conoce como luna nueva. Entre la luna llena y la luna nueva existe una fase en la que aparece cada día menos horas en el cielo nocturno y la parte iluminada visible desde la Tierra decrece (luna menguante). Ocurre lo mismo de forma inversa entre la luna nueva y la luna llena (luna creciente).

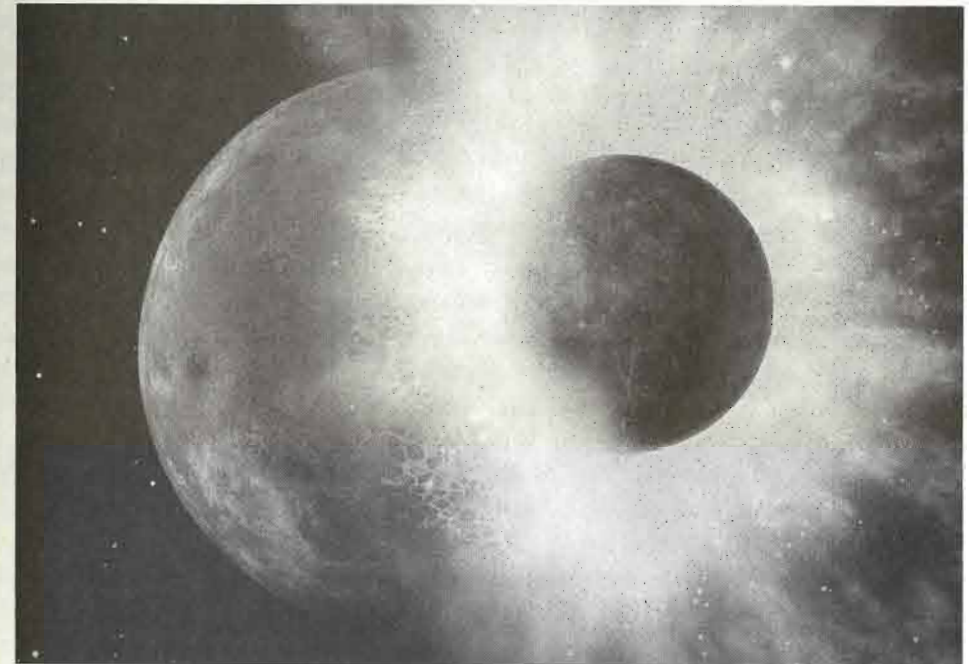
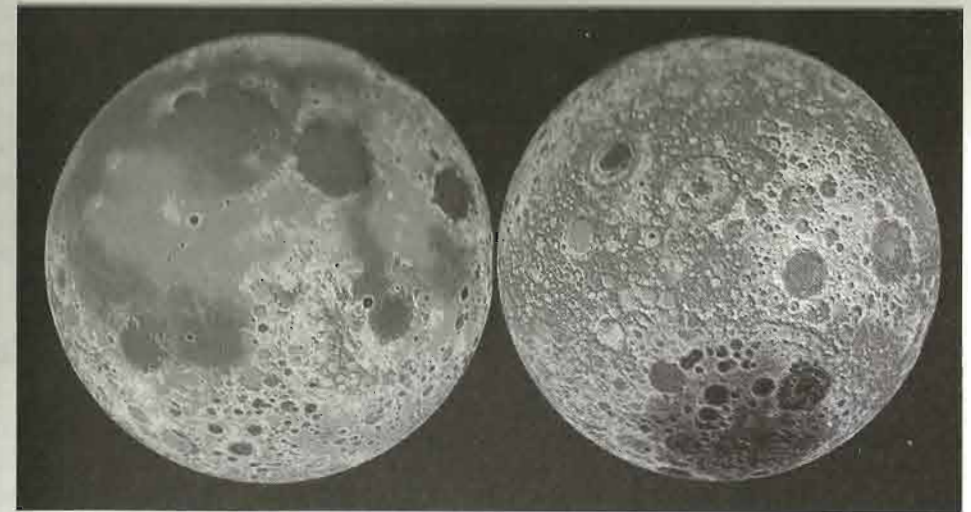
Su plano orbital está inclinado $5,1^\circ$ respecto al terrestre. Si no lo estuviera, los eclipses solares y lunares tendrían lugar cada luna nueva y cada luna llena, respectivamente. Al existir esta inclinación, la línea de intersección de ambos planos orbitales pasa por el Sol únicamente durante dos periodos al año. Esta es la frecuencia aproximada en la que se dan ambos tipos de eclipses (figuras 4 y 5). Dependiendo de la posición de la Luna, pueden ser totales o parciales. El radio lunar, de 1737 km, es



aproximadamente una cuarta parte del terrestre. Al ser la Luna menor que la Tierra, la sombra que hace sobre ella abarca solo una parte de la superficie terrestre. Por ese motivo, los eclipses solares solamente pueden verse en franjas concretas de nuestro planeta, que varían en cada eclipse. Los lunares, sin embargo, pueden observarse desde la mitad del planeta desde la que la Luna es visible mientras ocurren. Además, al ser la Tierra mayor, su sombra puede cubrir la Luna por completo.

La Luna es el satélite de planeta más cercano al Sol, ya que Mercurio y Venus no tienen ninguno. Es el mayor satélite del sistema solar interior, muy por delante de los dos pequeños satélites de Marte. Su densidad, de 3300 kg/m^3 , es algo menor que la de nuestro planeta, siendo su masa algo más del 1% de la terrestre. Esto lo convierte en el satélite más masivo en relación con su planeta de todo el sistema solar. Debido a ello, su gravedad tiene una cierta influencia sobre la Tierra, por ejemplo desplazando masas de agua de mares y océanos en lo que conocemos como *mareas*. La denominación *fuerza de marea* se utiliza por extensión para referirse a todos los efectos que ejerce la gravedad de un cuerpo de forma diferencial sobre las partes de otro. Las fuerzas de marea de la Luna influyen sobre la Tierra de varias maneras. Parecen ser las responsables de que el eje de rotación terrestre sea estable y no varíe caóticamente como el de Marte. Por otro lado, por efecto de las fuerzas de marea, la Luna se aleja de nuestro planeta unos pocos centímetros cada año. Para conservar el momento angular del sistema, la Tierra disminuye su velocidad de rotación, aumentando su periodo aproximadamente un segundo cada 60 000 años. Dentro de unos 2000 millones de años, la órbita de la Luna alcanzará un punto en que el periodo orbital coincidirá con el de rotación de la Tierra. En ese momento llegarán a una configuración en la que se presentarán siempre la misma cara sincronizados por sus mareas, como Plutón y Caronte.

Hoy en día es comúnmente aceptado que la Luna se formó debido al impacto tangencial que sufrió la primitiva Tierra por parte de un gran cuerpo con alrededor de un 10% de su masa (Tea). Este cuerpo se formó en su misma órbita y se fue acercando hasta que colisionaron. Según la teoría del gran impacto, una



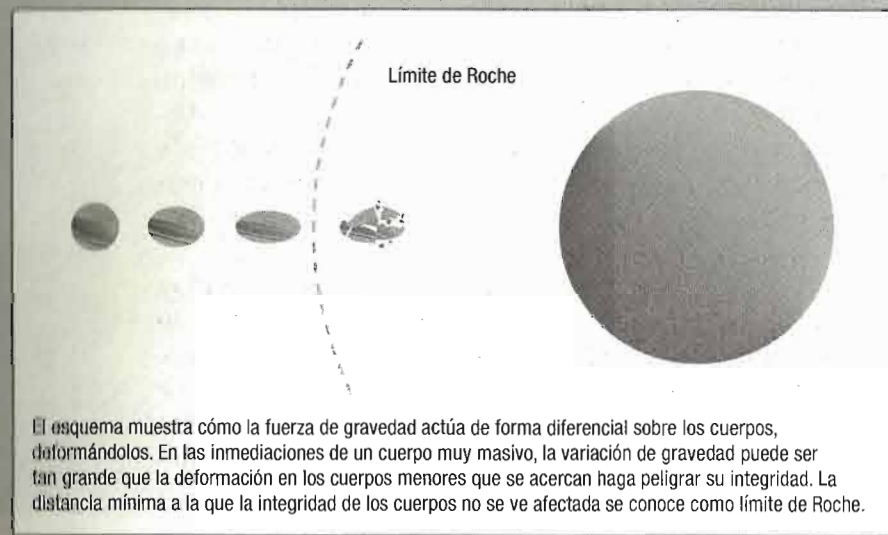
Arriba, imágenes topográficas de la cara visible (izquierda) y de la cara oculta (derecha) de la Luna. Abajo, representación de la colisión que, según la teoría del gran impacto, pudo dar origen al satélite.

LAS FUERZAS DE MAREA

La fuerza de la gravedad actúa de forma diferencial sobre las distintas partes de un cuerpo. En cuerpos suficientemente grandes y cercanos, la fuerza que ejerce uno sobre el otro puede ser mucho mayor en la parte más cercana que en la más lejana. Esto provoca en ellos una deformación, especialmente en las partes líquidas y gaseosas. Este es el origen del nombre de las fuerzas de marea, siendo las fuerzas gravitacionales ejercidas por la Luna y el Sol las responsables de las subidas y bajadas del nivel del mar en la Tierra.

Efectos sobre la rotación y la órbita: sincronización de periodos

Las fuerzas de marea pueden afectar también a la rotación y la órbita de los cuerpos. La influencia gravitacional de un planeta sobre sus satélites actúa frenando su rotación hasta que siempre le presentan la misma cara. De esta forma, los periodos de órbita y rotación de los satélites tienden a sincronizarse. La rotación sincrónica no solo está presente en la Luna, sino también en multitud de satélites en el sistema solar exterior. Del mismo modo, los satélites también ejercen una influencia gravitacional sobre los planetas, frenando o acelerando su rotación según sea su velocidad orbital. En cuanto a las órbitas de los satélites, se producen efectos distintos según la relación entre el periodo de la órbita del satélite y la rotación del planeta. Si la velocidad angular de la rotación del planeta es más lenta que la de la órbita del satélite o tiene sentido contrario, el centro de masas del planeta se atrasa respecto al satélite, que tiende a acercarse. Este es el caso de Fobos, en Marte, o Tritón, en Neptuno. Si la velocidad angular de la rotación es más rápida, el centro de masas del planeta se adelanta respecto al satélite, que tenderá a alejarse. Este es el caso de la Luna.



parte de su masa se fusionó con la Tierra, mientras que otra fue expulsada y aglutinada de nuevo formando la Luna. Esta teoría se vio apoyada tras las misiones lunares, al poder comprobar que las muestras que se trajeron de vuelta tenían una composición similar a las rocas de la corteza terrestre. El análisis de ciertos isótopos en la Tierra y en la Luna ha confirmado la existencia de la colisión, aunque siembra algunas dudas sobre el modo en que se formó nuestro satélite.

MARTE, EL GUERRERO VENCIDO

Es el cuarto planeta más cercano al Sol y el más alejado en el sistema solar interior. Su distancia media oscila entre 206,7 y 249,2 millones de kilómetros (perihelio y afelio, respectivamente). La acusada excentricidad de su órbita, de un 9,3%, ayudó a Kepler a descubrir la forma elíptica de las órbitas planetarias. En cuanto a su distancia a la Tierra, tiene una gran variación. Cuando están en lados opuestos del Sol puede llegar a 399 millones de kilómetros y cuando están en el mismo lado, a 56 millones. En las posiciones más favorables para su observación se convierte en el segundo planeta más brillante, después de Venus. Marte sigue a la Tierra en distancia al Sol, y aunque apenas tiene fases de sombra, son ligeramente perceptibles. El ángulo Sol-Marte-Tierra nunca supera los 42°. Su fase máxima de sombra, vista desde la Tierra, es como la de la Luna unos cuatro días antes o después de la luna llena. Si bien estas fases pasaron desapercibidas a Galileo, hoy en día se pueden ver con sencillos telescopios.

La rotación de Marte es muy similar a la de la Tierra, siendo su periodo de 24,6 horas y su inclinación axial de 25,2°. Este ángulo también experimenta variaciones, pero con un patrón más caótico que el terrestre. Al ser la excentricidad de su órbita mayor que la de la Tierra, la duración del ciclo día-noche tiene variaciones algo mayores a lo largo del periodo orbital. El mecanismo de las estaciones es similar al de las terrestres, aunque la gran excentricidad orbital provoca una desigualdad en su duración. Dado el largo periodo orbital de 687 días, la diferencia máxima

de duración entre estaciones es de más de cincuenta días. Este fenómeno también se da en nuestro planeta, pero con unas diferencias de pocos días.

Marte tiene un ligero achatamiento en los polos, algo mayor que el de la Tierra. Su radio ecuatorial es de 3397 km, y su radio polar, de 3375 km. Esto supone un 53% del radio terrestre, siendo su volumen del 15%. Al tener una menor densidad, de 3900 kg/m^3 , su masa es solo un 11% de la de la Tierra. La aceleración gravitacional que sufren los cuerpos en su superficie es una tercera parte de la que experimentan en la Tierra. En cuanto a su estructura interna, se han realizado varios modelos. Parece que tendría un denso núcleo metálico con un radio de algo más de la mitad del total. Estaría formado básicamente por hierro, níquel y azufre, y enriquecido con el doble de elementos ligeros que el núcleo terrestre. A su alrededor, un manto de silicatos sería el causante de las antiguas formaciones volcánicas y tectónicas en la superficie. La corteza, también compuesta por silicatos, sería algo más gruesa que la terrestre y tendría un espesor medio de 50 km.

La superficie marciana tiene una extensión equivalente al 28% de la terrestre, y está cubierta en gran parte por fino polvo de óxido de hierro, que le confiere su característico color rojizo. Por el tipo de polvo, existen zonas más claras y otras más oscuras, que pueden variar lentamente su disposición. En cuanto a su orografía, existen dos zonas claramente diferenciadas y separadas por un enorme desnivel. Por un lado, la zona norte es joven, profunda y llana. Conocida como Cuenca Borealis, probablemente se trate de una enorme cuenca de impacto elíptica. En sus bordes se localizan volcanes gigantes actualmente extinguidos, como los que forman el complejo de Tharsis. Aquí es donde se encuentra el Monte Olimpo, que, con más de 600 km de largo en la base y 25 km de altitud, es el mayor desnivel conocido en la superficie de un planeta en el sistema solar. Limitando con el complejo se encuentra el Valles Marineris, un cañón de 3000 km de largo, 600 km de ancho y 8 km de profundidad. Por otro lado, la zona sur es vieja, escarpada y presenta más cráteres. La morfología de estos es distinta a la de los cráteres lunares, ya que la tenue atmósfera marciana es suficiente para



Arriba, vista cercana de Marte creada a partir de imágenes tomadas por las sondas del programa Viking. Se puede ver el complejo volcánico de Tharsis a la izquierda y el Valles Marineris en el centro. Abajo, hielo sobre la ladera de un cráter del hemisferio sur del planeta rojo.

modelar el relieve. Los más antiguos han sufrido una importante erosión y presentan bordes desgastados. Además, muchos de los cráteres más pequeños o erosionados están cubiertos por la arena que traslada el viento.

En cuanto al agua, en la actualidad existe una minúscula parte de vapor en la atmósfera y una considerable cantidad de hielo en la superficie. Gran parte de este hielo se sitúa en los casquetes polares. Entre los dos suman algo más de la mitad del hielo de Groenlandia. Sus espesores, de kilómetros, y sus diámetros, de centenares de kilómetros, están sujetos a variaciones estacionales. El casquete norte es mucho más extenso que el sur, que puede llegar a desaparecer por completo. En la estación fría, los casquetes están en oscuridad permanente y se cubren por la condensación de una parte importante del dióxido de carbono atmosférico. Cuando la luz solar lo vuelve a sublimar, se crean fuertes vientos con patrones en espiral que dejan marcas en los casquetes. Hace unos años, se detectaron unas manchas oscuras cerca del casquete sur. Se cree que es el rastro de géiseres de dióxido de carbono provocados por la radiación solar. Al parecer, durante el deshielo se forman depósitos horizontales de dióxido de carbono gaseoso a un metro de profundidad bajo la capa de hielo estacional. La erupción de este gas a presión acompañado de arena sería la causante de las manchas.

En los últimos años se han detectado mediante radar indicios de la más que probable existencia de grandes cantidades de agua helada bajo la superficie de Marte. Este hielo se extiende por una amplia zona alrededor de los casquetes polares. Existen áreas concretas donde parece haber una concentración más elevada. Alrededor de estas concentraciones se observan formaciones geológicas que apoyan la presencia de hielo, como abanicos lobulares parecidos a los derrubios de los glaciares terrestres. En cuanto al agua líquida, la baja presión atmosférica dificulta su presencia, ya que se evapora con mucha facilidad. En algunas de las imágenes de la sonda Phoenix, enviada al casquete norte, se pueden apreciar sobre sus patas lo que parecen gotas de agua líquida. Se han detectado también lo que muy probablemente sean rastros estacionales de flujos esporádicos de agua líquida.

La tenue atmósfera marciana está formada básicamente por dióxido de carbono con algo de nitrógeno y trazas de vapor de agua. Es el resultado de un equilibrio entre la escasa actividad geológica, la combinación con elementos de la superficie y la pérdida de gases al espacio. Su presión en la superficie es menos de una centésima parte que en la Tierra, de modo que el vapor de agua solamente se solidifica en el suelo a temperaturas menores de -80°C . Durante el ciclo estacional, se produce una gran diferencia de presión entre los dos hemisferios a causa de la sublimación y condensación del dióxido de carbono en los polos. Esto provoca vientos que moldean el relieve marciano, erosionando las rocas y trasladando las partículas, que se agrupan en grandes extensiones con dunas en las zonas bajas. Desde la superficie, el cielo diurno se ve de color rosa salmón debido al polvo en suspensión. Ocasionalmente pueden darse grandes tormentas de polvo que llegan a abarcar todo el planeta y persisten durante semanas o meses. Existen también varios tipos de nubes de vapor de agua y dióxido de carbono, que pueden contener cristales de hielo en invierno.

Aun sin disponer de tantos datos como de la Tierra, se estima que en Marte la temperatura media es de aproximadamente -50°C . Es muy inferior a la terrestre, ya que recibe menos flujo de radiación por estar más lejos del Sol. También influye el hecho de que su tenue atmósfera apenas conserva el calor. Aunque está formada básicamente por dióxido de carbono, su cantidad es insuficiente para generar un efecto invernadero significativo. Esto provoca, además, una gran variación térmica entre el día y la noche. En la zona ecuatorial, la temperatura puede oscilar entre 20°C y -80°C en los solsticios. La variación estacional en los polos no es tan extrema, oscilando solamente entre -80°C y -130°C . Tiene una capa de ozono, al igual que la Tierra, aunque es unas mil veces más fina e incapaz de detener la radiación ultravioleta. También tiene una tenue ionosfera, con su máxima intensidad a 130 km de altitud, que se puede dividir en distintas capas definidas por la reflexión de ondas de distinta frecuencia.

Uno de los mayores atractivos de Marte es la posibilidad de que haya albergado algún tipo de vida. Aunque parece difícil la

existencia de vida en la actualidad, no es un tema cerrado. Hace unos años, se especuló sobre si las manchas estacionales en la zona de influencia del polo sur tenían carácter biológico. Por otro lado, se han detectado unas pequeñísimas trazas de metano en la atmósfera. Como este gas es inestable en las condiciones de Marte, tiene que haber una fuente de producción. Probablemente es de origen geológico, pero se está intentando determinar si podría ser de origen biológico. En cuanto a la vida en el pasado, se encontró en la Antártida un meteorito de origen marciano que presentaba unas formas que se interpretan como microorganismos fosilizados. Sin embargo, no es una prueba concluyente, ya que aún no se ha podido determinar si es el resultado de una contaminación terrestre.

Por otro lado, uno de los factores más importantes para el desarrollo de la vida tal y como la conocemos es la presencia de agua. Hay muchos indicios de la presencia en Marte de abundante agua líquida en el pasado. Por ejemplo, el porcentaje de moléculas de agua con deuterio (isótopo masivo del hidrógeno) es mayor en Marte que en la Tierra. Esto indica que la cantidad de agua líquida fue mucho mayor en el pasado y se perdió en el espacio. El deuterio no escapa tan fácilmente y su porcentaje en el agua remanente aumentó. También existen evidencias de erosión por grandes masas de agua. Se pueden observar lo que parecen restos de extensas redes hidrográficas e incluso antiguas líneas de costa. Si, como parece, en algún momento Marte tuvo grandes cantidades de agua líquida fue porque tenía un clima más cálido gracias a una atmósfera que permitía conservar el calor.

Se cree que en el pasado Marte pudo gozar de una atmósfera e hidrosfera significativas porque tenía un importante campo magnético que lo protegía del viento solar. Actualmente, el campo magnético es mucho más débil que el terrestre. No se ha detectado un campo magnético global, solamente extensas zonas superficiales a modo de paraguas. Las auroras provocadas por el viento solar pueden llegar a zonas cercanas al ecuador. No se sabe exactamente qué cambios en la estructura interior del planeta pudieron llevar a la debilitación del campo magnético. En todo caso, esta habría provocado la pérdida de la atmósfera por

la acción del viento solar. Al disminuir la presión y bajar la temperatura, el agua líquida habría desaparecido de la superficie.

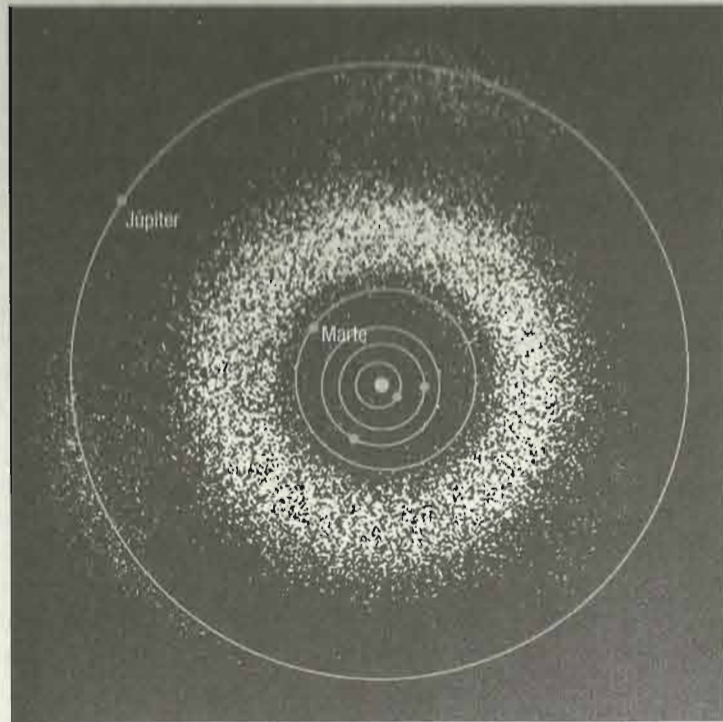
Marte cuenta con dos satélites menores, Fobos y Deimos, probablemente captados del cercano cinturón de asteroides. Descubiertos en el siglo XIX, recibieron los nombres de dos personajes que acompañaban al dios griego Ares (Marte para los romanos). Deimos, más lejano y pequeño, tiene una órbita más lenta que la rotación marciana, mientras que Fobos, más cercano y grande, tiene una órbita más rápida. Esto provoca que su trayectoria aparente tenga sentido contrario a la de Deimos y el Sol. Fobos sale y se pone unas dos veces a lo largo de un ciclo día-noche. Marte cuenta también con varios asteroides troyanos que lo preceden y suceden en su órbita. Este tipo de asteroides también están presentes en las órbitas de otros planetas, siendo los de Júpiter los más destacables.

EL CINTURÓN DE ASTEROIDES, UN PLANETA QUE PUDO SER

Más allá de la órbita de Marte existe una región altamente poblada por asteroides que delimita el sistema solar interior y se extiende hasta la órbita de Júpiter, el primer planeta del sistema solar exterior (figura 6). En esta región coexiste un gran número de asteroides con el planeta enano Ceres. Se calcula que la masa total del cinturón es de menos del 0,1 % de la masa terrestre. Ceres, con un radio medio de unos 475 km, tiene aproximadamente el doble de masa que los dos asteroides más masivos juntos, Pallas y Vesta. Entre los tres concentran casi la mitad del total de la masa del cinturón. Los incontables cuerpos que se localizan en esta región tienen tamaños diversos, hasta llegar a las partículas de polvo. A pesar de su número, están tan dispersos en el espacio que es muy difícil encontrar uno en caso de atravesar el cinturón.

Según su composición, los asteroides se clasifican en carbonáceos, silíceos o metálicos. Según sus órbitas, se pueden agrupar también en familias, cada una de las cuales procede de la desintegración de un cuerpo mayor. Las colisiones son relativamente frecuentes en términos astronómicos. Cada diez millones

FIG. 8



Esquema de la distribución actual estimada de los asteroides en el cinturón entre las órbitas de Marte y Júpiter. Se pueden ver también los asteroides troyanos que preceden y suceden a Júpiter en su órbita alrededor del Sol.

de años chocan dos asteroides de varios kilómetros de radio. Parte del material expulsado en las colisiones puede llegar a la Tierra. Se estima que este es el origen del 99,8% de los meteoritos detectados hasta la actualidad.

Al parecer, la mayoría de los asteroides se formaron en esta región en los primeros estadios del sistema solar, mientras se estaban formando los planetas. Se cree que la influencia gravitacional del joven Júpiter, el planeta más masivo, fue la que impidió que se concentraran en un único cuerpo. Probablemente se formaron

numerosos cuerpos de gran tamaño que se habrían ido desintegrando por colisiones externas e internas. Las perturbaciones gravitacionales de Júpiter habrían actuado fomentando las colisiones internas y restando masa al cinturón. La pérdida de masa fue uno de los factores que determinó que no se consolidara el planeta. Se estima que originalmente habría sido unas cien veces superior a la actual. Los efectos de las perturbaciones gravitacionales de Júpiter son perceptibles hoy en día en los huecos de Kirkwood. Son unas regiones donde la densidad de asteroides disminuye drásticamente y que coinciden con órbitas que están en resonancia con la de Júpiter. Los asteroides que entran en una de estas órbitas se ven desestabilizados y sus trayectorias se vuelven caóticas, siendo enviados muchas veces fuera del sistema solar.

El sistema solar exterior

Los planetas del sistema solar exterior orbitan a gran distancia del Sol, y sus masas, parcialmente gaseosas, son enormes. Cada uno tiene varias veces la masa de todos los planetas del sistema solar interior, que cabría entero entre las órbitas de dos planetas cualesquiera del sistema solar exterior.

El sistema solar exterior está constituido por los cuatro planetas más lejanos al Sol, que son, por orden de proximidad, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Ocupa una región mucho más extensa que el sistema solar interior. Neptuno orbita a una distancia media del Sol de unas treinta veces la terrestre (30,1 UA). Más allá existen aun otros cuerpos menores que se pueden agrupar en regiones como el cinturón de Kuiper, el disco disperso o la nube de Oort. Estas regiones contienen varios planetas enanos, como Plutón. Los límites exteriores del sistema solar no están perfectamente definidos. Para conocerlos mejor habrá que prestar atención a las valiosas informaciones que vayan enviando las misiones Voyager, que abandonaron la Tierra en 1977. Parece ser que en 2012 la Voyager 1 midió un incremento de unas cuarenta veces en la densidad de partículas a 121 UA. La interpretación que se ha dado a este hecho es que la sonda abandonó la heliosfera y entró en el medio interestelar.

Los cuatro planetas del sistema solar exterior son mucho más grandes y masivos que los del sistema solar interior. Están recubiertos por grandes masas gaseosas, por lo que se conocen como *gigantes gaseosos*. Los dos más cercanos al Sol, Júpiter y Saturno,

son de mayor tamaño. Parece que se formaron en los primeros millones de años del sistema solar, ya que aglutinaron alrededor de su núcleo grandes cantidades de hidrógeno y helio antes de que se dispersara la nube molecular. Júpiter, tres veces más masivo que Saturno, probablemente se desarrolló antes, acumulando un porcentaje de hidrógeno y helio del 97%, algo superior al 90% del segundo. Urano y Neptuno se formaron aún más tarde, almacenando solamente un 20% de ambos elementos. Estos dos planetas son conocidos como *gigantes helados*, ya que, al ser los más lejanos al Sol, sus temperaturas atmosféricas medias son muy bajas.

Los gigantes gaseosos se caracterizan por tener amplios sistemas de satélites y anillos. A diferencia de lo que se cree que pasó con la Luna, sus satélites no se formaron por grandes colisiones, dada la naturaleza gaseosa de estos planetas. Los satélites interiores se formaron probablemente a partir del disco planetario, como

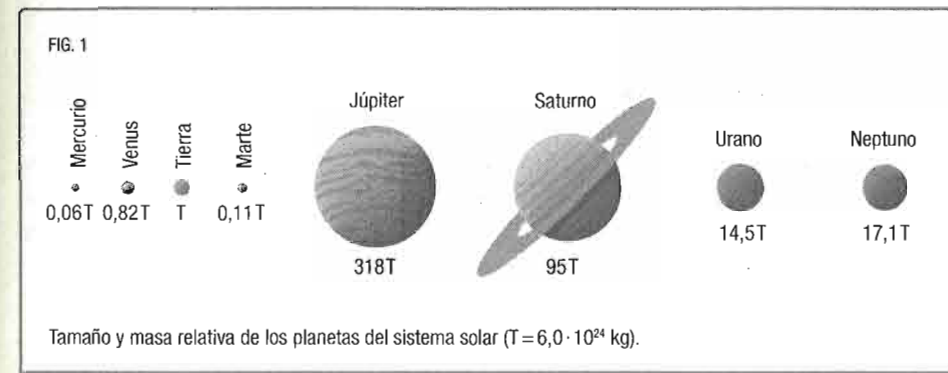
indican sus tamaños grandes y sus órbitas casi circulares en el plano ecuatorial del planeta. Los satélites exteriores probablemente fueron capturados, como sugieren sus tamaños pequeños y sus órbitas excéntricas e inclinadas. Algunos de los satélites tienen condiciones en las que podrían existir entornos con algún tipo de vida. Los más destacados son el satélite de Júpiter Europa, y los satélites de Saturno Encélado y Titán.

JÚPITER, EL COLOSO DE HIDRÓGENO

Es el quinto planeta más cercano al Sol y el más próximo del sistema solar exterior. Su distancia media es unas cinco veces la terrestre (5,2 UA), y oscila entre 740,6 y 816 millones de kilómetros (perihelio y afelio, respectivamente); su excentricidad orbital es de 4,8%. Su periodo es de 11,9 años, y su inclinación, de 1,3°. En cuanto a su rotación, tiene una pequeña inclinación axial de 3,1° y su periodo es el más corto de todos los planetas

del sistema solar: de las mediciones del campo magnético se deduce que es de 9,9 horas, aunque su superficie gaseosa presenta ligeras variaciones.

Júpiter es el segundo cuerpo más grande y masivo del sistema solar, tras el Sol, ocupando el primer lugar entre los planetas. Por su naturaleza gaseosa carece, al igual que los demás planetas del sistema solar exterior, de una superficie bien definida. Para determinar su tamaño se considera que su superficie es un esferoide donde la presión atmosférica es de 100 000 Pa, aproximadamente la misma que en la superficie terrestre. No se trata de un límite físico, sino simplemente de una delimitación establecida para tener una superficie de referencia. Por encima del esferoide, los compuestos se encuentran en estado gaseoso. Por debajo, se produce una transición gradual del estado gaseoso al líquido según aumentan la profundidad y la presión. Su naturaleza fluida hace que este esferoide tenga un achatamiento considerable, siendo sus radios ecuatorial y polar de 71 492 km y 66 854 km, respectivamente. Esto supone más de diez veces el radio de la Tierra y más de mil veces su volumen. Al ser su densidad de 1 300 kg/m³, menor que la terrestre, su masa es solo 318 veces mayor. Con todo, es tres veces mayor que la de Saturno, el segundo planeta más masivo, y casi dos veces y media la suma del resto de planetas (figura 1). Aun siendo menos de una milésima parte de la masa solar, es suficiente para que el centro de masas de ambos esté ligeramente fuera del Sol. Simplificando, el centro de masas es el punto en el



que al aplicar una fuerza no se produce giro, como en el punto central de una balanza en equilibrio. Considerando solamente ambos cuerpos, se puede decir que el Sol orbita alrededor de un punto ligeramente exterior a él por el efecto de Júpiter. Actualmente, sigue su proceso continuo de enfriamiento, irradiando más calor del que recibe del Sol. Este proceso conlleva una contracción que se estima en unos pocos centímetros al año. Cuando se formó, su diámetro era el doble que en la actualidad. Si hubiese conseguido acumular más masa, su densidad sería mayor y su volumen se habría reducido aún más.

Teniendo en cuenta su densidad, se sabe que Júpiter está formado básicamente por hidrógeno y helio. Se estima que el porcentaje de ambos gases está en torno al 97%. En el exterior se hallan en estado gaseoso, pero conforme aumenta la profundidad se comprimen progresivamente, incrementando su presión y temperatura. Estos cambios influyen en su estado y carácter. No se conocen con detalle ni la composición exacta ni las propiedades de los materiales a las altas presiones y temperaturas que hay en su interior. Probablemente existe una parte central sólida, consistente con las hipótesis sobre su formación, que estaría dividida en dos capas. El núcleo interno estaría compuesto por silicatos y hierro, mientras que la capa contigua estaría formada por agua, metano y amoníaco. Esta parte central sólida podría haber desaparecido parcialmente en la actualidad. Medidas gravitacionales realizadas por varias naves espaciales sugieren que tendría una masa de entre el 4% y el 14% de la masa total del planeta. La misión Juno, actualmente en curso, tiene previsto aportar un poco de luz sobre el tema estudiando sus campos magnético y gravitacional.

Por encima de la parte sólida parece que existe un manto de hidrógeno y helio que llega hasta unos 15 000 km de la superficie. Alrededor del núcleo la temperatura y la presión serían del orden de 36 000 °C y de $4 \cdot 10^{12}$ Pa. En estas condiciones el hidrógeno tendría un carácter metálico y habría podido erosionar el núcleo original. Este manto no tiene un límite perfectamente definido, el gas va disminuyendo suavemente su temperatura y su presión a medida que aumenta la distancia al núcleo. El hidrógeno perdería su carácter metálico a la distancia en que temperatura y presión



Arriba, imagen de Júpiter compuesta por la sonda Voyager 1. Abajo, visualización tridimensional del paisaje entre dos capas de nubes en Júpiter, elaborada a partir de datos espectrales recogidos por la sonda Galileo.

bajasen aproximadamente a $10\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $2 \cdot 10^{11}\text{ Pa}$. Por encima del manto habría una zona donde el hidrógeno tendría un carácter fluido supercrítico. Es decir, estaría en un estado entre líquido y gas, con un comportamiento intermedio. Se considera que el carácter líquido predomina por debajo de los $1\,000\text{ km}$ de profundidad y el carácter gaseoso, por encima.

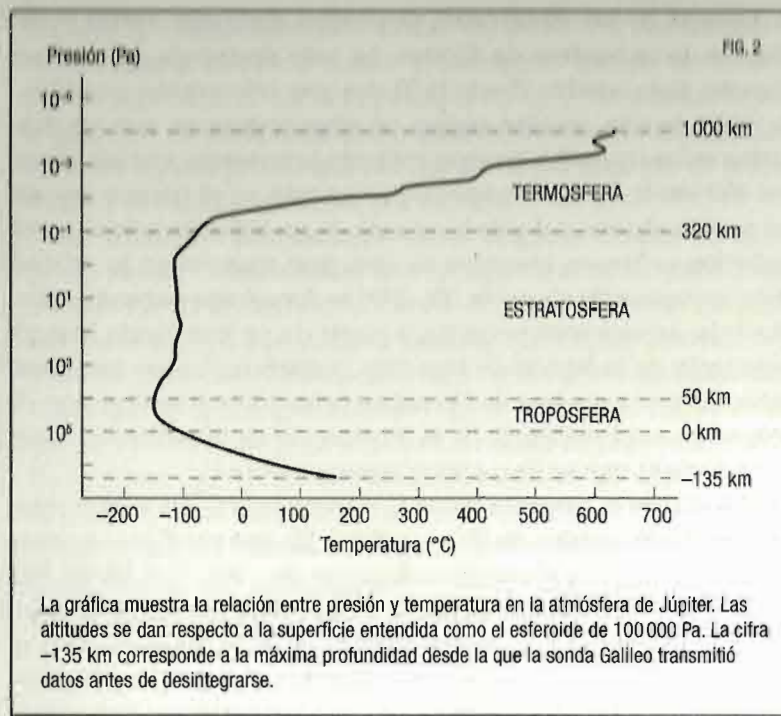
La atmósfera propiamente dicha empieza a unos 90 km de profundidad, considerando que la superficie es el esferoide de $100\,000\text{ Pa}$. Es la mejor conocida de las atmósferas de los gigantes gaseosos, ya que la nave Galileo, que orbitó alrededor del planeta entre 1995 y 2003, envió una sonda que transmitió datos hasta que se desintegró a 135 m bajo la superficie. Está formada por un 87% de hidrógeno y un 13% de helio. La proporción de helio es menor que en la nube molecular a partir de la que se formó el planeta, pues una parte ha precipitado hacia las capas inferiores. También existen cantidades mucho menores de diversos compuestos, que se agrupan formando nubes. De abajo arriba, las nubes son de vapor de agua, compuestos de azufre y amoníaco. Se encuentran en la troposfera, la capa de la atmósfera más cercana a la superficie, donde se dan la mayoría de los fenómenos meteorológicos. Es muy turbulenta, con tormentas convectivas que pueden alcanzar los 150 km en vertical, acompañadas de un importante aparato eléctrico. En la base de la troposfera, la temperatura y la presión son de unos $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un millón de pascales, y ambas disminuyen con la altitud hasta la siguiente capa.

La dinámica atmosférica presenta unas tendencias globales con cinturones de bandas oscuras y claras distribuidos en paralelo al ecuador. Están delimitados por un sistema de vientos zonales de gran intensidad. Mientras que las bandas oscuras tienen bajas presiones, las zonas claras tienen altas presiones. En la zona clara ecuatorial, los vientos pueden alcanzar los 360 km/h en la parte central y los 500 km/h en los márgenes. En el límite más distante al ecuador de las otras zonas claras, los vientos van en la dirección de rotación. En el menos distante, van en dirección contraria y no son tan fuertes. No se conoce hasta qué profundidad existen estos vientos ni si tienen algún tipo de interacción con posibles corrientes en el interior del manto.

Además de los cinturones, se pueden distinguir varias manchas en la atmósfera de Júpiter. La más destacada es la Gran Mancha Roja, visible desde la Tierra con telescopios sencillos. Se trata de una enorme región de altas presiones, con un diámetro mayor que el terrestre, rodeada por vientos que alcanzan los 400 km/h . Es un fenómeno persistente en el tiempo que se ha podido observar desde hace más de un siglo. Ya a finales del siglo xix , se tienen registros de una gran mancha en la misma zona, aunque más alargada. En 2006 se formó una segunda mancha roja, aunque más pequeña, a partir de un gran óvalo blanco resultante de la fusión de tres más pequeños. Ambas manchas sobresalen por encima de las nubes principales y se cree que el color rojo es el resultado de la interacción de la radiación solar con los gases que se encuentran a mayor altitud.

El límite de la troposfera con la estratosfera se encuentra más de 50 km por encima de la superficie. En ese nivel la temperatura y la presión son aproximadamente de $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $10\,000\text{ Pa}$, respectivamente (figura 2). En la estratosfera las temperaturas dejan de disminuir y aumentan hasta $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ en su límite con la termosfera, a una altitud de unos 320 km . En ese nivel la presión es de $0,1\text{ Pa}$. En la termosfera, las temperaturas aumentan con un mayor ratio hasta alcanzar los $725\text{ }^{\circ}\text{C}$ a unos $1\,000\text{ km}$ de altitud, donde la presión es de $0,0001\text{ Pa}$. Se especula que estas elevadas temperaturas podrían tener su origen en la absorción de la radiación solar de alta frecuencia o en la interacción con la magnetosfera. Sea como sea, en la termosfera existen capas con una alta densidad de electrones e iones que forman la ionosfera.

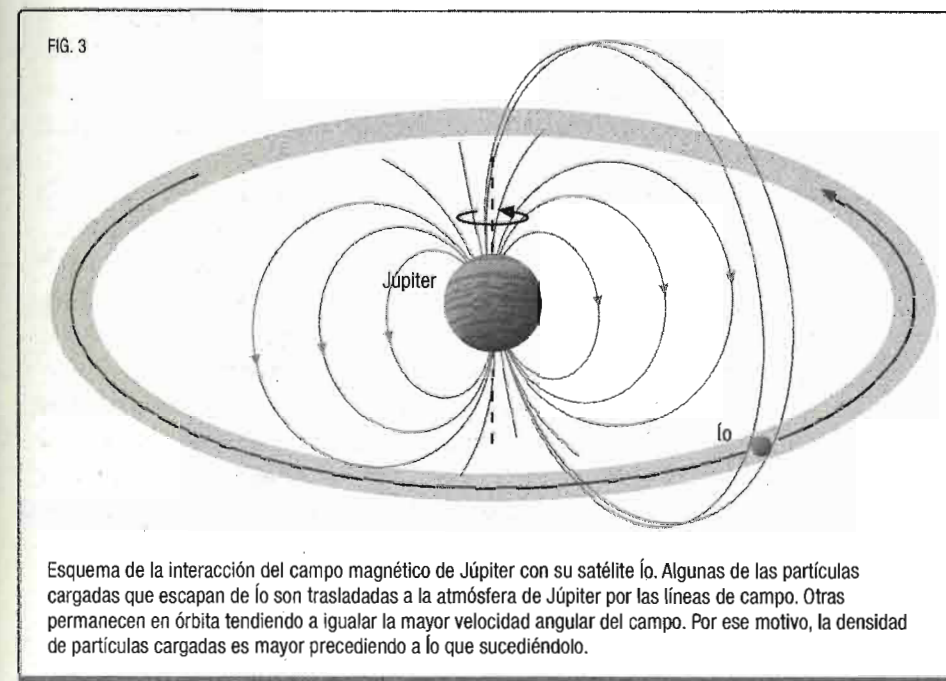
En cuanto a los satélites, Júpiter tiene al menos 67 con órbitas confirmadas. De todos ellos, solamente ocho tienen órbitas con baja excentricidad y poca inclinación respecto al plano ecuatorial del planeta. Los cuatro más pequeños, situados a distancias de entre $128\,000\text{ km}$ y $222\,000\text{ km}$, son los más cercanos y la fuente principal de polvo que alimenta el tenue sistema de anillos situado en franjas alrededor de sus órbitas. Le siguen, a distancias de entre $421\,000\text{ km}$ y $1\,883\,000\text{ km}$, los cuatro mayores, Ío, Europa, Ganimedes y Calisto, ya identificados por Galileo. Los cuatro presentan rotaciones síncronas a sus periodos orbita-



les. Los de Ío, Europa y Ganímedes están, además, en resonancia 4:2:1. El más cercano a Júpiter es Ío que, con más de 400 volcanes activos, es el cuerpo del sistema solar con mayor actividad volcánica. Esto se debe al efecto de las fuerzas de marea del masivo Júpiter, que está suficientemente cerca para provocarle una gran deformación acompañada de fricción interna. El segundo en distancia es Europa, que a pesar de ser el más pequeño de los cuatro es quizá el más interesante, ya que se piensa que podría albergar entornos con algún tipo de vida. Le sigue Ganímedes, el mayor satélite del sistema solar. Finalmente, el cuarto en distancia y segundo en tamaño es Calisto. Los dos últimos tienen un tamaño similar a Mercurio —Ganímedes incluso lo supera—, pero su densidad y su masa son bastante más bajas. El resto de satélites de Júpiter son mucho más pequeños y lejanos. Sus órbitas tienen grandes excentricidades e inclinaciones, siendo muchas

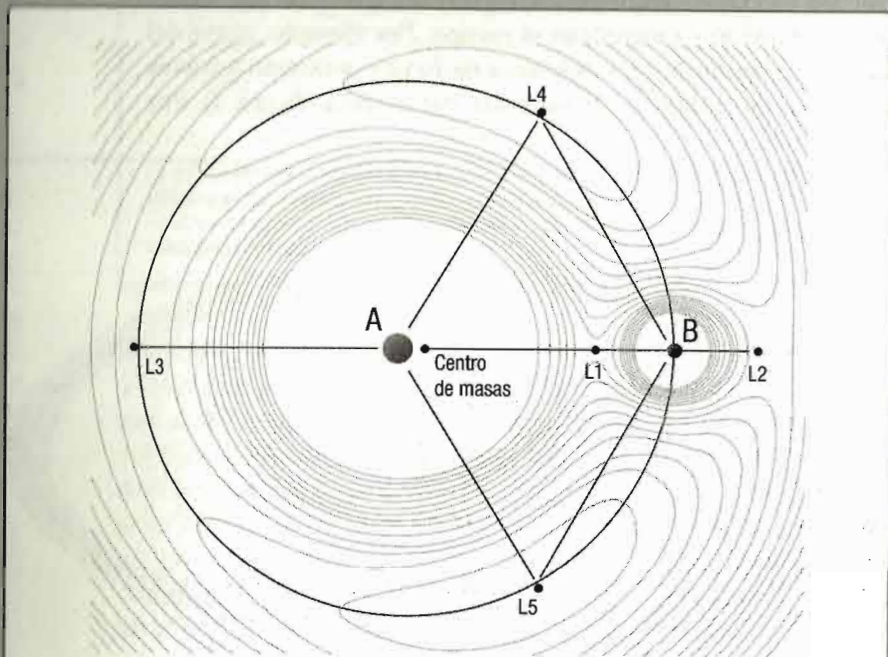
de ellas retrógradas. Todo esto indica que fueron capturados con posterioridad a la formación de Júpiter, probablemente del cercano cinturón de asteroides. Además de su complejo sistema de satélites y anillos, Júpiter cuenta también con un gran número de asteroides troyanos que lo preceden y suceden en su órbita alrededor del Sol. Otros planetas tienen troyanos, pero estos son los más numerosos. Es probable que procedan del cinturón de asteroides.

El campo magnético de Júpiter es muy intenso, siendo al menos dieciocho mil veces más potente que el terrestre. Probablemente tiene su origen en corrientes en el manto de hidrógeno metálico provocadas por la rotación del planeta. Existen también corrientes eléctricas fluyendo de Júpiter a algunos de sus satélites que fortalecen y magnifican el campo. Por ejemplo, parte del material expulsado por los volcanes de Ío es conducido a través de las líneas de campo hacia los polos del planeta (figura 3). Por



TROYANOS Y PUNTOS DE LAGRANGE

En el cinturón de asteroides solamente han permanecido aquellos asteroides con órbitas que minimizaban la interacción gravitacional con Júpiter. Los troyanos han conseguido órbitas estables en regiones en torno a puntos en la órbita de este planeta pero desplazados unos 60° respecto a su posición. Estos puntos se conocen como *puntos de Lagrange* L4 y L5. Los puntos de Lagrange son las cinco posiciones relativas a dos cuerpos, A y B, orbitando alrededor de un centro de masas en las que un tercer cuerpo de masa mucho menor puede mantener una posición estacionaria respecto a ambos. Los puntos L1, L2 y L3 están situados en la recta que une los dos cuerpos principales, uno entre ellos (L1) y los otros dos en las partes exteriores (L2 y L3). Para órbitas circulares o con poca excentricidad, los puntos L4 y L5 están situados en los vértices de los dos triángulos equiláteros que tienen como lado el segmento que une los dos cuerpos principales. Es decir, donde se cortarían las órbitas relativas de uno respecto al otro.



Esquema de la posición relativa de los cinco puntos de Lagrange respecto a dos cuerpos orbitando alrededor de un centro de masas. Las curvas cerradas corresponden a líneas en el plano del esquema (superficies en el espacio) en las que el campo gravitacional tiene un valor constante. En el caso del Sol y Júpiter, las regiones en torno a los puntos L4 y L5 se encuentran pobladas por asteroides.

efecto del campo magnético, tienen lugar en la ionosfera impresionantes auroras polares y emisiones de rayos X. La magnetosfera se extiende mucho más allá del sistema de satélites principales, moldeada por el viento solar. Su onda de choque se encuentra a varios millones de kilómetros en dirección al Sol y su cola sobrepasa la órbita de Saturno.

Europa, corazón de hierro, cicatrices de hielo

Es el sexto satélite más cercano a Júpiter, en una órbita situada a una distancia media de unos 671 000 km y con un 0,9% de excentricidad. Su órbita y su rotación están sincronizadas, con un periodo de 85,2 horas, y sus inclinaciones son muy leves. Su radio medio es de 1 560 km, siendo el más pequeño de los cuatro satélites galileanos y también el cuarto del total. Su tamaño y su densidad son ligeramente inferiores a los de la Luna, siendo su masa unas dos terceras partes de la de nuestro satélite. En cuanto a su estructura interna, las características de sus capas se han podido estimar a partir de su interacción con el campo magnético de Júpiter. Constaría de un pequeño núcleo de hierro, rodeado de una capa de rocas silíceas, similar al manto y la corteza de los planetas del sistema solar interior, y una capa exterior de agua de unos cien kilómetros de grosor. La parte inferior de esta capa de agua sería fluida y tendría por encima una gruesa corteza de hielo con un espesor de entre diez y treinta kilómetros. Una parte inferior de agua líquida con sales disueltas explicaría la conductividad que se calcula a partir de las mediciones magnéticas de la nave Galileo.

Su superficie es muy lisa, con variaciones máximas de altitud de apenas cien metros y muy pocos cráteres. Teniendo en cuenta la elevada frecuencia de impactos que se le supone, es una superficie joven, con tan solo unas pocas decenas de millones de años. Está cubierta por largas vetas oscuras entrecruzadas que se alargan centenares de kilómetros y cuya anchura alcanza los veinte kilómetros. Sus márgenes son difusos, pero parece que ha habido desplazamiento entre ambos lados. En la parte interior

existen estrías regulares y una franja central más clara. Su estructura recuerda a las dorsales oceánicas terrestres, y es posible que su dinámica sea la fuente de renovación que explicaría la joven superficie. Esta renovación no se produciría con magma a altas temperaturas como sucede en la Tierra, sino con agua a bajas temperaturas, fenómeno conocido como *criovulcanismo*. En 2012 se detectaron lo que parecen ser emisiones de vapor de agua eyectadas desde la superficie en el polo sur. La energía necesaria para mantener el interior fluido y posibilitar los fenómenos criovolcánicos vendría de las fuerzas de marea. Si bien Europa siempre presenta la misma cara a Júpiter, este es lo bastante cercano y masivo para que la pequeña excentricidad orbital sea relevante. Se calcula que, entre el perihelio y el afelio, la superficie de Europa presenta una diferencia de unos treinta metros de altitud en su punto más cercano a Júpiter. Los patrones que presentan las vetas se alejan de lo esperado dada su antigüedad. Esto se podría explicar si la superficie se desliza sobre la capa fluida con una rotación diferencial respecto al resto del planeta. Existen también formaciones abovedadas, cóncavas y manchas oscuras. Se cree que estas últimas se formaron por agua líquida que ascendió del interior.

Igual que los otros satélites galileanos (Ío, Ganímedes y Calisto), Europa tiene una tenue atmósfera que no es suficiente para conservar la energía de la radiación solar. La temperatura media en superficie es de unos -170°C . En el ecuador es algo superior y en los polos, inferior, siendo la diferencia de unos setenta grados. Está formada por oxígeno, probablemente liberado por el impacto de partículas que chocan con la superficie levantando vapor de agua. Este se descompone y el hidrógeno escapa de la gravedad del satélite. Tiene, además, una tenue ionosfera creada por la radiación solar y la interacción con la magnetosfera de Júpiter. Esta también influye en su campo magnético, la cuarta parte de intenso que el de Ganímedes y similar al de Calisto.

Aunque no hay ninguna evidencia al respecto, Europa podría albergar formas de vida primitivas. Las condiciones en el ecuador son comparables a las del lago Vostok, en la Antártida, donde se ha encontrado vida microbiana en torno a formaciones volcáni-

cas. Estudios recientes indican que el agua líquida en el interior de Europa tendría una importante cantidad de oxígeno. Si se tiene en cuenta la fuente de calor interno capaz de generar la actividad criovolcánica, podrían existir entornos propicios para el desarrollo de la vida. Para evitar la contaminación de Europa y otros satélites con microorganismos terrestres, la misión Galileo terminó enviando la nave a desintegrarse en la atmósfera de Júpiter.

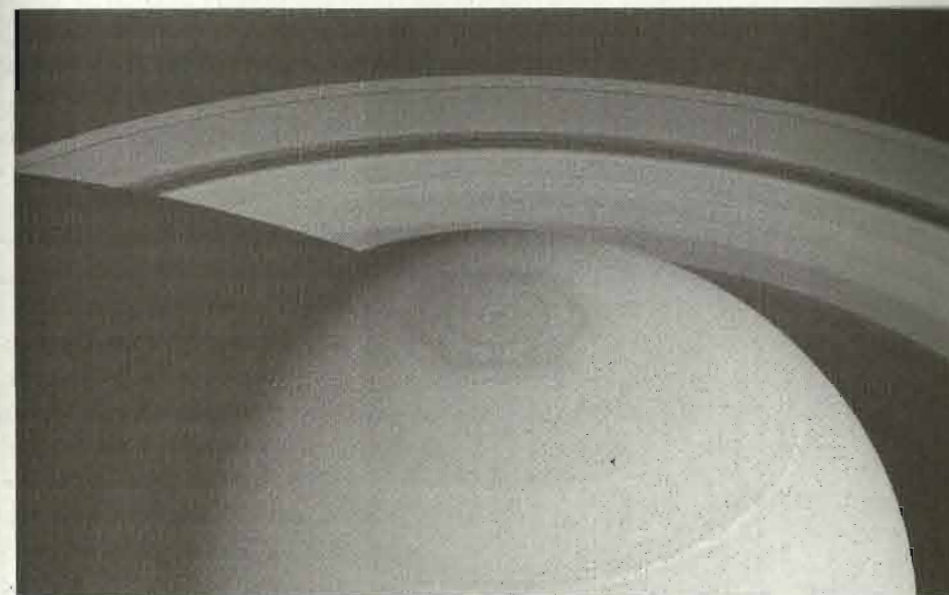
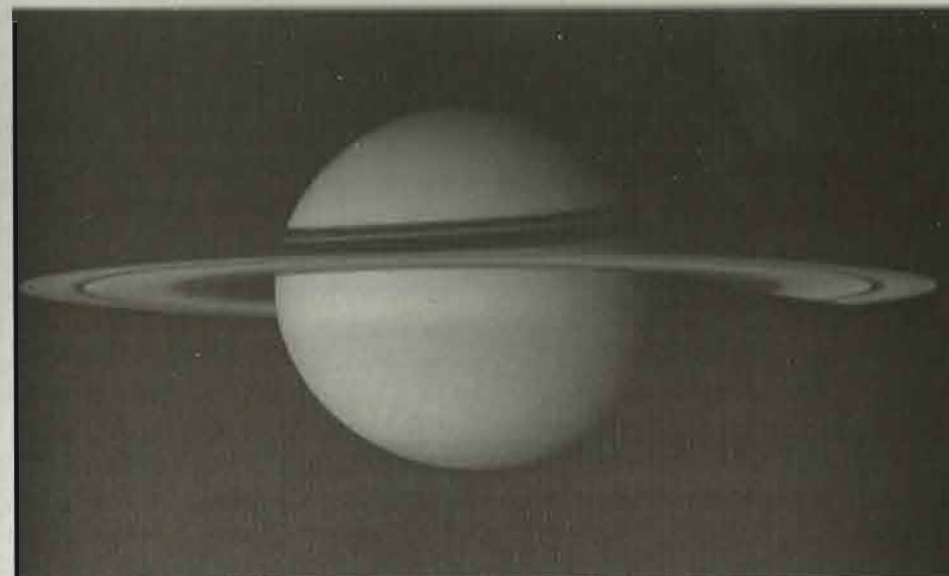
SATURNO, UNA JOYA DE GAS Y ROCAS

Es el sexto planeta más cercano al Sol, con una distancia media unas diez veces la terrestre (9,6 UA). Oscila entre 1 240 y 1 500 millones de kilómetros (perihelio y afelio, respectivamente), siendo su excentricidad orbital de 5,4%. Su periodo orbital es de 29,5 años, lo que supone una resonancia orbital con Júpiter muy cercana a 5:2. Aproximadamente cada cinco vueltas de Júpiter y dos de Saturno, ambos planetas coinciden en el mismo punto de sus órbitas, coincidencia que provoca en ellas ligeras modificaciones. Estas son más evidentes en la órbita de Saturno, ya que Júpiter es tres veces más masivo. Actualmente, su inclinación orbital, de $2,5^{\circ}$, es la más alta entre los planetas del sistema solar exterior. Su periodo de rotación es de 10,2 horas, aunque su superficie gaseosa presenta también ligeras variaciones. Su inclinación axial, de $26,7^{\circ}$, es algo mayor que las de la Tierra y Marte, y algo menor que la de Neptuno. Una de sus características más distintivas es su importante sistema de anillos, que fue el primero en ser detectado y es visible desde la Tierra con sencillos telescopios.

Es el segundo planeta más grande y masivo del sistema solar, después de Júpiter. Igual que él, carece de una superficie interior bien definida y se considera como tal el esferoide con presión de 100 000 Pa. Teniendo en cuenta esta definición, sus radios ecuatorial y polar son de 60 268 km y 54 364 km, respectivamente. Es el planeta más achatado por los polos, debido a su naturaleza fluida, su rápida rotación y su relativamente baja densidad, de tan solo 700 kg/m^3 , la menor de todos los planetas. Esta baja densidad hace que a pesar de tener un tamaño similar al de Júpiter

su masa sea unas tres veces menor. Al igual que su planeta vecino, experimenta un proceso de lenta contracción que conlleva que irradie más calor del que recibe del Sol. Todo indica que sus estructuras internas son bastante similares. La de Saturno constaría también de un núcleo sólido, un manto en el que el hidrógeno tendría carácter metálico y, finalmente, una zona en la que el hidrógeno se hallaría en un estado intermedio líquido-gaseoso. Al tener menos masa y presión interna, esta última zona tendría más predominancia gaseosa y grosor, lo que explicaría su gran volumen y baja densidad.

Su atmósfera está formada básicamente por hidrógeno y algo de helio, como la de Júpiter, aunque con una menor proporción del segundo. Igualmente, existen trazas de otros compuestos, como agua y amoníaco, que se condensan formando nubes. Al igual que la de su planeta vecino, se puede dividir en troposfera, estratosfera y termosfera. En la primera también existen cinturones correspondientes a vientos zonales, aunque menos definidos. En el ancho cinturón ecuatorial los vientos pueden alcanzar los 450 km/h. A ambos lados, los patrones son muy simétricos a pesar de la alta inclinación axial del planeta. De vez en cuando, se forman tormentas que pueden durar centenares de días, las más largas detectadas en el sistema solar. Su aparato eléctrico también es impresionante, con descargas diez mil veces más potentes que las que se dan en la Tierra. En 2010 se detectó una tormenta con un ancho de unos cinco mil kilómetros, tan grande que rodeó el planeta por completo. Se visualizó como una gran mancha blanca con una estela detrás y supuso un incremento de temperatura de 65 °C en la estratosfera, el más alto jamás registrado en Saturno. Una de las peculiaridades más interesantes de su atmósfera son los vórtices polares, que tienen características especiales respecto a los observados en la Tierra y Venus. En el polo norte existe un patrón hexagonal de ondas estacionarias de unos 14 000 km de lado que rota a la misma velocidad que el planeta (véase la imagen inferior de la página contigua). En el polo sur no existen ondas hexagonales persistentes, pero se detectó el ojo de un huracán con unos 8 000 km de diámetro y vientos que superaban los 500 km/h.



En la imagen superior, Saturno con sus anillos, fotografiado por la sonda Cassini. En la imagen inferior se puede distinguir el patrón de ondas hexagonales en el polo norte de Saturno.

LOS ANILLOS DE SATURNO: CÍRCULOS DE HIELO Y ROCA

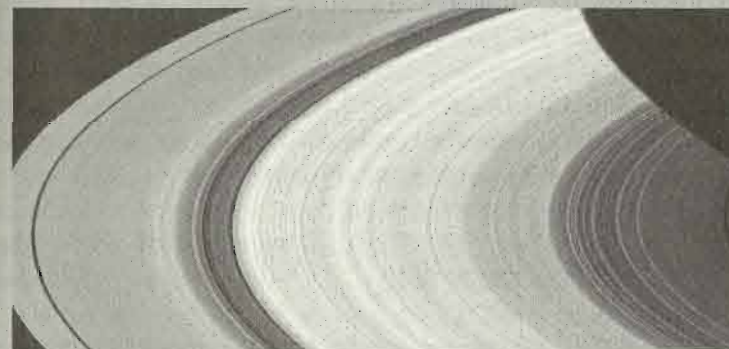
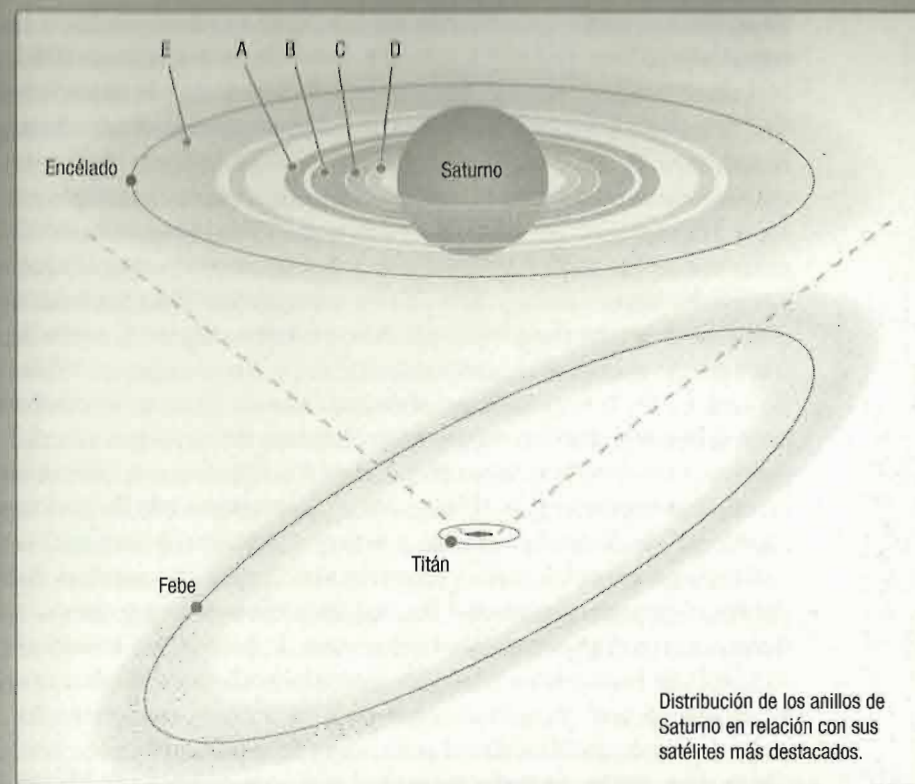
Ya detectado por Galileo hace más de cuatro siglos, el sistema de anillos de Saturno fue identificado como tal por Christiaan Huygens en 1659. Están formados por un número inmenso de pequeños cuerpos orbitando alrededor de Saturno, compuestos básicamente por agua helada. Su tamaño varía desde rocas de unos cuantos metros hasta partículas microscópicas. No se pueden aglutinar en un único cuerpo y formar un satélite, ya que se encuentran dentro del límite de Roche, lo que significa que su propia gravedad no sería suficiente para contrarrestar las fuerzas de marea provocadas por Saturno y mantenerlos unidos. En cuanto a sus órbitas, la mayoría se encuentran en el plano ecuatorial del planeta y tienen radios de entre 67 000 km y 480 000 km.

El despliegue de los anillos

En la estructura de anillos existen regiones de mayor y menor densidad, con unas claras delimitaciones marcadas por las resonancias orbitales de los satélites. Estas regiones se nombran con letras mayúsculas, siendo las principales los anillos A y B, separados por la división de Cassini. En la parte exterior, el anillo A está limitado por un cinturón de pequeños satélites que pudieron originarse por la desintegración de un satélite mayor. El anillo B presenta oscuras estructuras radiales, probablemente relacionadas con el campo magnético de Saturno, que podrían tener un carácter estacional. En la parte interior se encuentran los tenues anillos C y D, cuyo límite interior está a menos de 7 000 km de la superficie del planeta. Fueron descubiertos a caballo entre las décadas de 1960 y 1970. Desde entonces se han descubierto en la parte exterior algunos anillos más, completos y arcos, compartiendo órbitas con varios satélites. El más exterior de los situados en el plano ecuatorial es el anillo E. A mucha más distancia existe otro anillo, que se extiende desde los seis millones de kilómetros hasta la órbita del último satélite importante, Febe, a unos trece millones de kilómetros. Este anillo presenta una inclinación orbital de 153° , y sus partículas probablemente proceden de Febe, que tiene una órbita retrógrada.

El origen de los anillos

Los anillos de Saturno tienen un elevado coeficiente de reflexión, lo que indica que sus partículas son relativamente nuevas. Por otro lado, se ha calculado que las perturbaciones gravitacionales de los satélites modificarían las órbitas de los anillos hasta acercarlas al planeta y terminarían desintegrándose por abrasión en unos centenares de millones de años. A partir de estos datos se puede deducir que existe una fuente de renovación de los anillos. Parece ser que esta fuente podrían ser los satélites, muchos de los cuales comparten órbitas con los anillos. Un posible mecanismo para esta renovación sería mediante el bombardeo de micrometeoritos, que arrancarían partículas a los satélites que se incorporarían a los anillos. En el caso del anillo E, la principal fuente de suministro de materia es Encélado, en cuya órbita se encuentra la máxima densidad de partículas. En este caso, el mecanismo consiste en la eyección de partículas a través de géiseres localizados en el polo sur del satélite, como muestran algunas de las imágenes captadas por la nave Cassini.



También tiene un gran número de satélites, como Júpiter, al menos 62 con órbitas confirmadas. Muchas de las peculiaridades de estos han sido descubiertas en los últimos años gracias a la nave Cassini, que está orbitando alrededor de Saturno desde 2004. Llevaba consigo la sonda Huygens, que fue enviada a la superficie de Titán, el satélite más grande, cuya masa es más de veinte veces la del resto de satélites juntos. La sonda fue bautizada en honor del astrónomo holandés Christiaan Huygens, que lo descubrió en 1655. En la región interior de la órbita de Titán, los satélites coexisten con los anillos y algún troyano. Los mayores son Mimas, Encélado, Tetis, Dione y Rea. Tanto estos como Titán presentan rotaciones sincronas a sus periodos orbitales. Algunos, además, tienen resonancias, aunque no tan regulares como en los satélites de Júpiter. En la región exterior de la órbita de Titán, los satélites probablemente fueron capturados después de la formación del planeta, como indican sus órbitas muy excéntricas e inclinadas, en muchos casos incluso retrógradas. Los mayores son Heperión, Jápeto y Febe, cuya órbita marca el final del último de los anillos.

El campo magnético de Saturno es el segundo más intenso del sistema solar, por detrás del de Júpiter. Probablemente también tiene su origen en corrientes del manto de hidrógeno metálico. Al igual que en su planeta vecino, la magnetosfera interactúa con la ionosfera provocando auroras polares y emisiones de radiación electromagnética. En el polo norte la aurora consiste en un único gran anillo, en lugar de varios como en Júpiter o la Tierra. Existen también alrededor de Saturno cinturones de electrones e iones generados por la interacción entre el viento solar, los satélites y los anillos. Giran de forma sincronizada con el campo magnético, interactuando con él de forma similar a como ocurre en Júpiter. La magnetosfera se extiende más allá del sistema de satélites principales, moldeada por el viento solar.

Encélado, océanos subterráneos

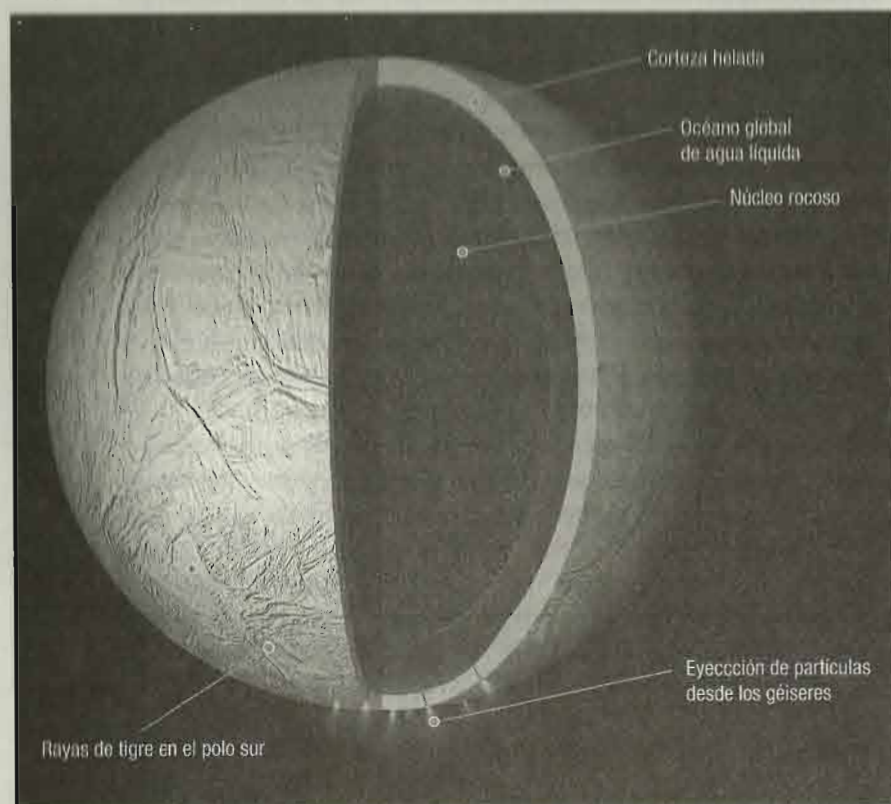
Es el decimocuarto satélite más cercano a Saturno, en una órbita con una distancia media de unos 237 000 km y un 0,4% de excen-

tricidad, en el centro de la parte más densa del anillo E. Su órbita y su rotación están sincronizadas, con un periodo de 32,9 horas, y sus inclinaciones son casi inexistentes. Tiene, además, una resonancia orbital 2:1 con Dione. Su radio medio, de 252 km, es casi siete veces menor que el de la Luna, siendo el sexto satélite más grande de Saturno. Teniendo en cuenta los efectos gravitacionales en la trayectoria de la nave Cassini, se estima que su masa es unas 680 veces menor que la lunar. Esto da una densidad de 1600 kg/m^3 , del orden de la mitad que la de nuestro satélite. Los relativamente pocos conocimientos que se tienen de su interior se han obtenido del estudio detallado de las oscilaciones en su rotación. Parece que tiene un núcleo interior rocoso y a su alrededor una capa de agua parcialmente fluida, bajo una corteza de hielo de unos treinta o cuarenta kilómetros.

En la superficie existen zonas llenas de cráteres, así como otras muy lisas. En las primeras, la densidad de cráteres es menor que en otros satélites de Saturno. Las zonas lisas son jóvenes en términos geológicos, con una edad estimada de tan solo cien millones de años. Esto indica que existe una renovación de la superficie, al parecer relacionada con largas grietas lineales. Alrededor del polo sur existe una llanura muy joven atravesada por cuatro grietas conocidas como *rayas de tigre* (figura 4). Cada una tiene unos cien kilómetros de largo, dos de ancho y quinientos metros de profundidad. La nave Cassini ha podido tomar imágenes en las que aparecen géiseres eyectando gran cantidad de partículas desde su interior. Concentrada sobre esta zona se ha detectado una tenue atmósfera formada básicamente por vapor de agua. Muchas de las partículas eyectadas consiguen escapar a la gravedad del satélite, alimentando el anillo E de Saturno. Las que se depositan sobre la superficie confieren a Encélado un coeficiente de reflexión de 0,99, el más alto del sistema solar; es decir, solo absorbe el 1% de la radiación solar que recibe. Este es el motivo de su baja temperatura media en la superficie, de unos -200°C .

Sorprendentemente, en la zona del polo sur la temperatura es superior a la media. Se desconoce de dónde procede este calor capaz de generar las grietas y los géiseres, y por qué se manifies-

FIG. 4



Arriba, esquema de la hipotética estructura interna de Encélado, donde se muestra también la localización de las rayas de tigre. A la izquierda, detalle de dichas rayas, con la ubicación actual de los géiseres. Esta posición puede variar ligeramente, ya que los géiseres pueden llegar a taponarse por el material eyeccionado y reaparecer en otros sitios.

ta en el polo sur. Es probable que tenga relación con las fuerzas de marea del cercano y masivo Saturno, como en el caso de Europa y Júpiter. El criovulcanismo actual en Encélado podría ser simplemente un episodio transitorio con una duración de pocos millones de años que se presenta con una periodicidad de centenares de millones de años. Hay hipótesis que señalan que las grietas se habrían generado en zonas más próximas al ecuador al subir una masa de agua menos fría del interior y romper la corteza. Posteriormente, se habría trasladado a la zona polar por efecto de la fuerza centrífuga. El material más frío y denso tendería a desplazarse al ecuador, mientras que el material menos frío y denso tendería a desplazarse a los polos.

El hecho de que exista agua líquida bajo la superficie y una fuente de calor interno, indican que podrían darse entornos propicios para el desarrollo de la vida. Es posible que los géiseres estén alimentados por depósitos poco profundos calentados por fuentes hidrotermales. Si hubiera cierta cantidad de agua líquida cerca de la superficie, resultaría más sencillo poder encontrar alguna forma de vida.

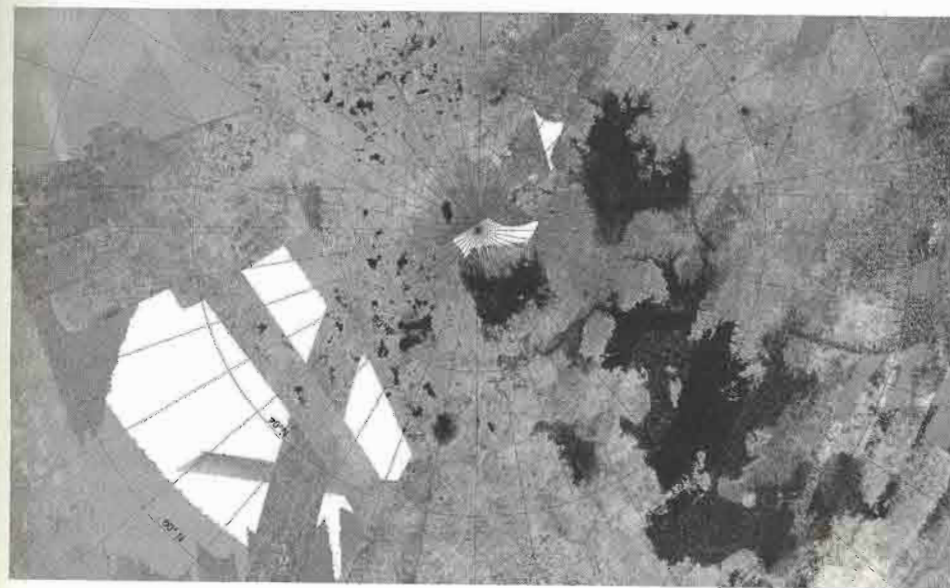
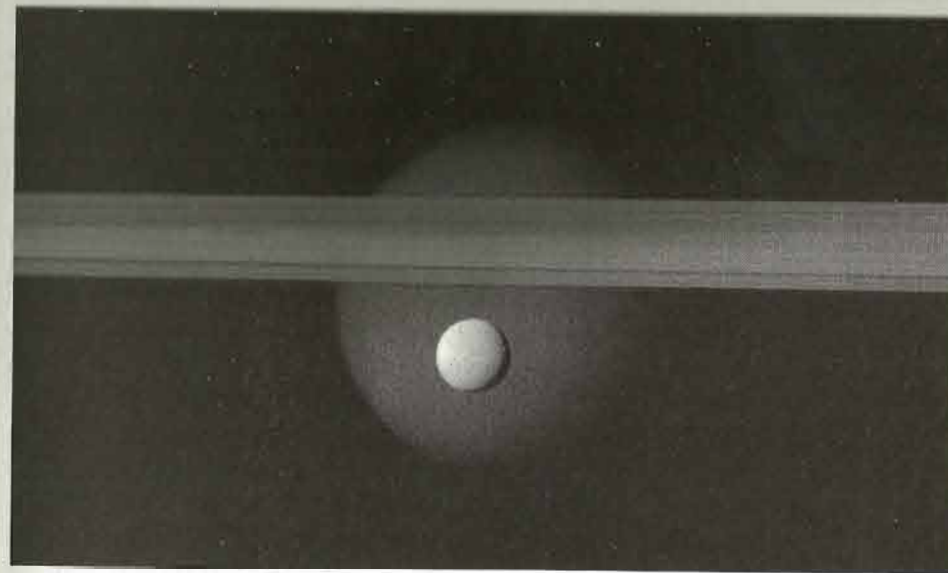
Titán, lluvias de metano

Es el vigesimosegundo satélite más cercano a Saturno, en una órbita con una distancia media de unos 1 221 000 km y un 2,9% de excentricidad. Su órbita y su rotación están sincronizadas, con un periodo de 15,9 días. Al ser su inclinación orbital mínima y la axial casi inexistente, su ciclo estacional es de unos 29,5 años, como el de Saturno. Su radio medio, de 2 575 km, es casi una vez y media mayor que el de la Luna, siendo el mayor satélite de Saturno. Es, además, el segundo mayor del sistema solar, por detrás de Ganímedes y por delante de Calisto, ambos satélites de Júpiter. Es incluso mayor que Mercurio, aunque por su baja densidad, de 1900 kg/m^3 , su masa es menos de la mitad. Según las últimas investigaciones, parece que su núcleo estaría formado por una mezcla de roca y hielo. Solamente en los quinientos kilómetros más externos desaparecería la roca.

Estudios recientes apuntan que podría existir una capa de agua parcialmente fluida a unos cien kilómetros de profundidad, bajo una corteza de hielo con material rocoso y metano disuelto.

La superficie de Titán se esconde tras una densa y opaca atmósfera. Su topografía se conoce desde hace solo unos años gracias a mapeados con radar realizados por la nave Cassini. En general es un relieve suave, pero se han detectado cordilleras montañosas con altitudes de hasta 2000 m que se extienden más o menos en paralelo al ecuador. Las fuerzas capaces de generar esta orografía vendrían de la contracción por enfriamiento del satélite. Existen pocos cráteres de impacto, lo que indica que la superficie se encuentra en constante renovación. Se han detectado estructuras que parecen criovolcanes, aunque no está confirmado que lo sean. En la zona ecuatorial, existen extensos campos de dunas con altitudes de hasta 150 m. Parecen estar formadas por un núcleo central de agua helada rodeado de granos de materia orgánica de varios milímetros, que se forman por precipitación desde la atmósfera y no por erosión. Se extienden paralelas a lo largo de cientos de kilómetros, respondiendo a un patrón global. Probablemente los sedimentos son transportados desde zonas alejadas del ecuador. Serían las fuerzas de marea del masivo Saturno las que crearían el movimiento atmosférico y los vientos en la superficie capaces de generarlas.

Se han podido localizar en la superficie de Titán gran cantidad de lagos de hidrocarburos, sobre todo en las zonas cercanas a los polos (véase la imagen inferior de la página contigua). Su baja reflectividad en el radar indica profundidades de al menos decenas de metros. Esto lo convierte en el único cuerpo, aparte de la Tierra, donde se han localizado importantes masas de líquido en superficie. Según los datos enviados por la nave Cassini, existen más lagos en el hemisferio norte que en el sur, lo que indica que podrían tener un carácter estacional. Los lagos más extensos tienen centenares de kilómetros de lado y se los llama *mares* por su gran tamaño en relación con el satélite. Desembocando en estos mares se han detectado varios ríos, el mayor de los cuales tiene unos 400 km de longitud y una forma muy rectilínea, probablemente por seguir una falla preexistente. En el hemisferio sur,



Arriba, imagen de Titán visto a más de un millón de kilómetros de distancia, tras los anillos de Saturno y el satélite Encélado. La imagen inferior es una representación de las posiciones de los lagos y mares del hemisferio norte de Titán a partir de los datos obtenidos por el radar de la nave Cassini.

existen lagos y cauces secos recubiertos por una capa de materia orgánica similar al alquitrán. Al parecer, es el rastro que dejan los hidrocarburos líquidos al infiltrarse en el subsuelo.

Titán es el único satélite del sistema solar con una atmósfera considerable. Su presión en superficie es un 40% superior a la terrestre. Está formada básicamente por nitrógeno, conteniendo hasta un 6% de hidrocarburos. Básicamente se trata de metano, etano y otros compuestos más complejos, que forman una importante capa nubosa cuya rotación es más rápida que la del planeta. Esta capa impide el paso de la radiación solar, dejando la superficie muy oscura, con una iluminación unas mil veces menor que en la Tierra. La temperatura media en superficie es del orden de -180°C . En estas condiciones, el ciclo del metano en Titán es similar al del agua en la Tierra, condensándose formando nubes y precipitando. Una vez en el suelo, se desplaza a través de las redes de ríos hasta lagos y mares, donde parece que se infiltra en el subsuelo. Estudios recientes señalan que otros hidrocarburos formados a partir del metano serían más estables en estado líquido. Al precipitar, el metano podría convertirse en etano u otros compuestos más complejos. En cualquier caso, la mezcla de hidrocarburos líquidos tendría grandes cantidades de metano en disolución.

Se desconoce cómo se mantiene la concentración de metano en la atmósfera. Sin ninguna fuente de alimentación, se precipitaría por completo sobre la superficie en unos centenares de millones de años. La fuente parece ser la liberación del metano disuelto en el hielo de la superficie, aunque no se conoce el mecanismo. Probablemente tiene que ver con el criovulcanismo, pero no se sabe con certeza. Hipótesis recientes indican que el episodio actual de liberación habría empezado hace quinientos millones de años y sería el resultado de corrientes de convección provocadas por la expulsión de calor desde su núcleo. También se han sugerido hipótesis que implican el impacto de un asteroide.

Dada la baja temperatura y la ausencia de agua líquida en la superficie, parece poco probable la existencia de formas de vida primitivas. Sin embargo, las esperanzas de encontrar vida en este satélite han aumentado tras demostrar estudios realizados en la

Tierra que pueden desarrollarse organismos microbianos en altas concentraciones de hidrocarburos. Desde luego, en Titán existen los hidrocarburos y el nitrógeno que podrían proporcionar los bloques básicos para formar moléculas orgánicas prebióticas. Si se confirma el criovulcanismo, podría existir algún escenario en el que fuera posible el desarrollo de la vida. En todo caso, es mucho lo que no comprendemos aún sobre este satélite, e incluso se ha especulado con formas de vida basadas en el metano en lugar de en el agua.

URANO, UN MUNDO HELADO

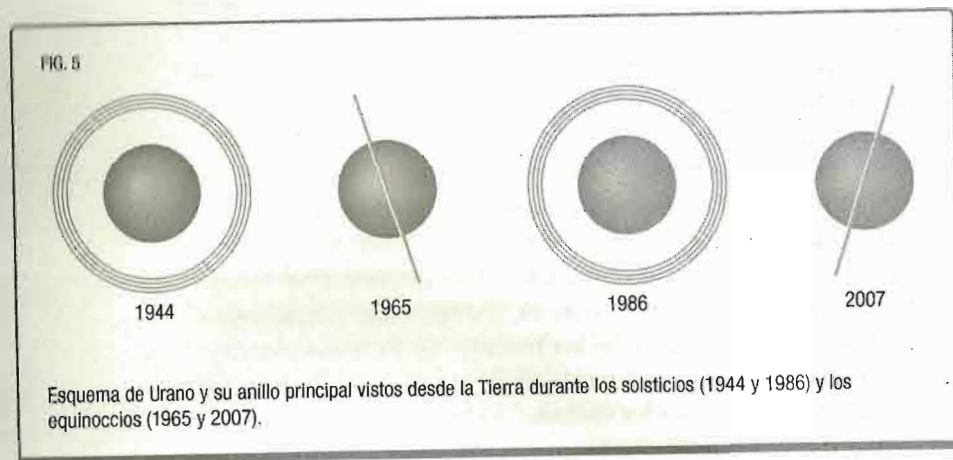
Es el séptimo planeta más cercano al Sol, con una distancia media unas diecinueve veces la terrestre (19,2 UA). Oscila entre 2749 y 3004 millones de kilómetros (perihelio y afelio, respectivamente), siendo su excentricidad orbital de 4,7%. Su inclinación orbital es de $0,8^{\circ}$ y su periodo de 84 años. En cuanto a su rotación, su periodo es de 17,2 horas y su inclinación axial de $97,8^{\circ}$, siendo esta una de sus características más singulares. Es superior a 90° porque se tiene en cuenta su sentido de rotación, que se puede considerar retrógrada. Esta gran inclinación tiene como consecuencia un régimen estacional peculiar. En los solsticios, uno de los hemisferios está completamente encarado al Sol y solo una pequeña parte en el ecuador tiene ciclos día-noche. En los equinoccios, el ciclo día-noche es igual en todo el planeta. Su largo periodo orbital hace que las estaciones duren un promedio de 21 años. Las zonas polares reciben más radiación solar a lo largo del año; sin embargo, la temperatura es, sorprendentemente, más elevada en el ecuador.

Los planos de órbita de sus satélites y anillos se corresponden aproximadamente con su plano ecuatorial. El motivo de estas inclinaciones no se conoce, aunque se especula que pueden deberse al impacto de un gran cuerpo durante su formación. La visión que tenemos de Urano desde la Tierra no dista mucho de la que se tendría desde el Sol, ya que está muy alejado de ambos. Si los tres formaran un triángulo, los dos lados con vértice en Urano

serían unas veinte veces mayores que el otro. Por tanto, desde la Tierra lo podemos ver en dos posiciones extremas, o bien con sus anillos alrededor, como una diana (en los solsticios, como en 1986), o bien con los anillos completamente de perfil, como una línea (en los equinoccios, como en 2007) (figura 5).

Urano es el tercer planeta más grande del sistema solar, tras Júpiter y Saturno. Al igual que estos, no tiene una superficie definida y para establecer su tamaño se considera el esferoide de 100 000 Pa. De esta forma, sus radios ecuatorial y polar tienen 25 559 km y 24 973 km, respectivamente. El radio medio es unas cuatro veces el terrestre, siendo su volumen más de sesenta veces mayor. Sin embargo, su masa es solo 14,5 veces la de nuestro planeta, ya que su densidad, de $1\,300\text{ kg/m}^3$, es mucho menor. Al ser esta también algo menor que la de Neptuno y tener ambos tamaños similares, este último lo relega a la cuarta posición en la clasificación de masas.

No se conocen con exactitud su composición ni su estructura interna. Sin embargo, hay indicios para creer que consta de un núcleo rocoso de silicatos y hierro relativamente pequeño, rodeado de un manto formado por materiales menos densos, como agua, amoníaco y metano. Según distintos modelos, el núcleo tendría un radio de menos del 20% del total, correspondiéndole una masa de entre el 5% y el 25%. El manto tendría un carácter



fluido, con alta densidad y conductividad eléctrica, y su masa estaría entre el 65% y el 90%. Esta discrepancia entre modelos se debe a que podría haber cantidades importantes de roca o hidrógeno en el manto. Muchas veces se usa la palabra *hielo* para referirse a la densa mezcla que forma el manto, aunque su temperatura es de miles de grados. Antes de llegar a la superficie, habría una capa con un grosor del 20% del radio total, formada por hidrógeno, helio y metano en estado gaseoso. Tanto la concentración de metano como las de agua y amoníaco disminuyen con la distancia al núcleo.

El calor interno de Urano, al menos su flujo térmico, parece ser más bajo que el de los otros planetas gigantes. Neptuno, situado a mayor distancia del Sol y recibiendo algo menos de la mitad de radiación solar, tiene una temperatura atmosférica similar. La energía que irradia Neptuno excede en un 160% la que recibe del Sol, en cambio Urano apenas la excede en un 10%. De hecho, aun siendo mucho más masivo que la Tierra, el flujo térmico de Urano es más bajo que el de nuestro planeta. Hay varias hipótesis para explicar este fenómeno. Quizá el posible impacto que provocó su inclinación axial expulsó todo el calor de su núcleo, o quizá existe una configuración de capas que actúa como barrera térmica e impide la salida del calor interno.

Su atmósfera tiene una temperatura media de unos $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, muy similar a la de Neptuno, lo que les ha valido a ambos el nombre de *gigantes helados*. Está constituida por hidrógeno y helio, como en los otros gigantes gaseosos, aunque el porcentaje de helio es mayor, de un 25% aproximadamente. Es un porcentaje similar al que habría tenido la nube molecular a partir de la que se formó el sistema solar. Esto indica que en Urano el helio no se ha precipitado en las capas inferiores, como en sus planetas vecinos. El tercer compuesto más abundante es el metano, que se condensa en nubes en la parte inferior. Por debajo existen probablemente otras de agua, así como de compuestos de amoníaco y azufre. Una de las fuentes de información más importantes sobre la atmósfera de Urano sigue siendo la nave Voyager 2, la única que lo ha visitado hasta la fecha. Cuando lo hizo, cerca del solsticio de 1986, no registró grandes indicios de

actividad meteorológica. Sin embargo, alrededor del equinoccio de 2007 sí se detectó actividad desde la Tierra. Por ejemplo, una cierta estructura de cinturones con vientos de hasta 900 km/h o una gran mancha oscura.

La atmósfera no tiene un límite inferior bien definido, por lo que se considera como aquella parte de la envoltura gaseosa de la que se puede obtener información directa mediante sensores. Su grosor es mucho mayor que en los otros gigantes gaseosos, llegando hasta 50 000 km de altitud y solapándose con el sistema de satélites y anillos. La troposfera empieza a 300 km de profundidad bajo la superficie, entendida como el esferoide de 100 000 Pa, y termina a 50 km sobre esta. En ella tienen lugar la mayoría de fenómenos meteorológicos. Su presión y su temperatura en la base son de 10 millones de pascals y 45 °C, respectivamente, disminuyendo con la altitud hasta 10 000 Pa y -220 °C en la parte superior. Por encima se encuentra la estratosfera, que llega hasta 4 000 km de altitud. En la parte inferior se han detectado trazas de hidrocarburos más complejos que el metano, probablemente transformado por efecto de la radiación ultravioleta. La presión disminuye con la altitud hasta 10^{-6} Pa en la parte superior. Por el contrario, la temperatura aumenta hasta valores de entre 525 °C y 575 °C en su parte superior. Por encima se encuentra la termosfera, donde la temperatura se mantiene en esos valores mientras que la presión y la densidad disminuyen hasta desvanecerse. Se desconoce el porqué de tan elevada temperatura, ya que ni la radiación solar ni la interacción con el campo magnético parecen suficientes para sostenerla. A caballo entre la estratosfera y la termosfera se encuentra la ionosfera.

Urano cuenta con un total de 27 satélites con órbitas confirmadas. Entre los 49 000 y los 98 000 km se pueden encontrar trece pequeños satélites con baja excentricidad y poca inclinación respecto al plano ecuatorial de Urano. Compartiendo espacio con estos satélites se encuentra el sistema de anillos, el segundo en ser descubierto, tras el de Saturno. Los anillos están agrupados en varias formaciones que se extienden aproximadamente desde los 26 000 km hasta los 103 000 km, encontrándose la parte más densa a 51 000 km. Seguidamente, se localizan los cinco

satélites mayores, a distancias de entre 129 000 km y 584 000 km, también con bajas excentricidades e inclinaciones orbitales. Son Miranda, Umbriel, Ariel, Titania y Oberón, siendo los dos últimos los de mayor tamaño, con un radio menor que la mitad del lunar. A una distancia mucho mayor que la de Oberón existen otros nueve satélites menores, cuyas órbitas, altamente excéntricas e inclinadas, indican que fueron capturados.

El campo magnético de Urano es mucho menos intenso que los de Júpiter y Saturno. Es solo unas cincuenta veces más potente que el terrestre. Su eje principal está desplazado un tercio del radio del planeta respecto al centro, e inclinado unos 59° respecto al eje de rotación. Además, en la superficie existe una diferencia de un orden de magnitud entre las intensidades de ambos hemisferios. Esta fuerte asimetría, también presente en Neptuno, podría ser debida a que en los gigantes helados los campos magnéticos se generan a menor profundidad, en zonas más alejadas del núcleo. En todo caso, alrededor de los polos magnéticos también aparecen auroras. Por otro lado, el campo también arrastra partículas cargadas procedentes del planeta que colisionan con los satélites y anillos. La erosión que sufren estos últimos es la causa más probable de su color oscuro. La onda de choque de la magnetosfera se encuentra a más de veinte veces el radio planetario en dirección al Sol y su cola se extiende millones de kilómetros. Esta presenta una forma atornillada, provocada por la rotación de Urano y su campo electromagnético, cuando su eje de rotación altamente inclinado coincide con la dirección en la que la magnetosfera se aleja del planeta en sentido contrario al Sol.

NEPTUNO, EL MENOR DE LOS GIGANTES

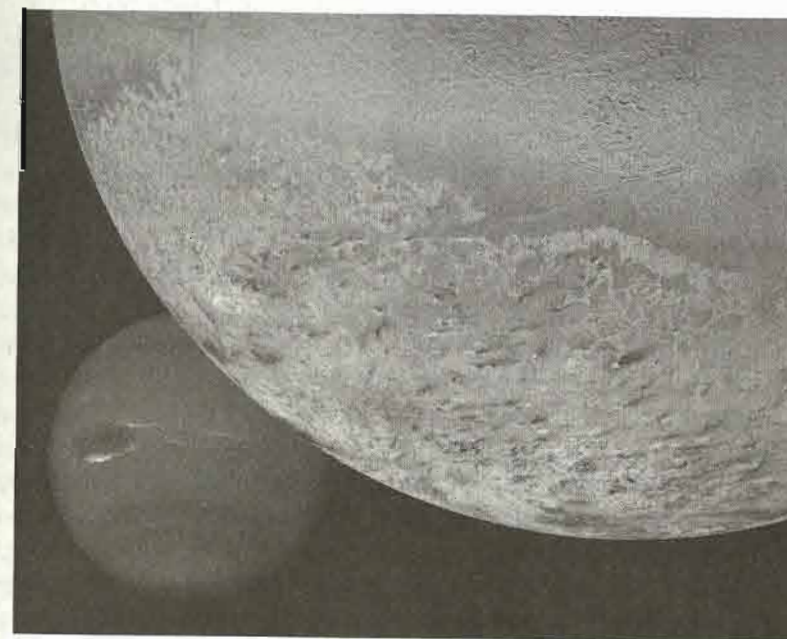
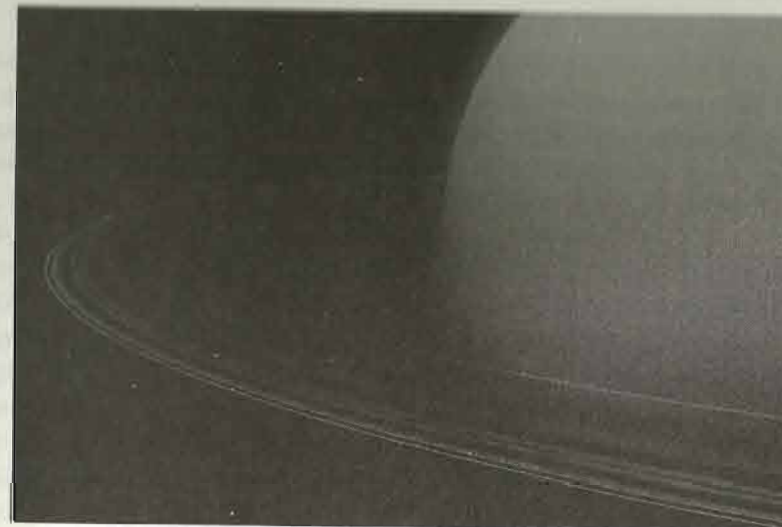
Es el planeta más alejado del Sol, con una distancia media de unas treinta veces la terrestre (30,1 UA). La distancia que los separa oscila entre 4 453 y 4 554 millones de kilómetros (perihelio y afelio, respectivamente), siendo su excentricidad orbital de 0,9%. Su inclinación orbital es de 1,8° y su periodo de 164,8 años.

En 2011 completó su primer periodo orbital desde su identificación en 1846. Fue el último planeta en ser descubierto, gracias a la predicción teórica de su órbita. Los cálculos se realizaron a partir de las anomalías que producía en la órbita de Urano, identificado varias décadas antes. El periodo de rotación de Neptuno es de 16,1 horas y su inclinación axial de $28,3^\circ$.

Es el cuarto planeta más grande del sistema solar, y el más pequeño del sistema solar exterior. Considerando como superficie el esferoide con presión de 100 000 Pa, sus radios ecuatorial y polar son de 24 766 km y 24 342 km, respectivamente. Al ser de tamaño similar a Urano y tener una mayor densidad, de $1\,600\text{ kg/m}^3$, le arrebató la tercera posición en la clasificación de masas. La masa de Neptuno es 17,1 veces mayor que la terrestre. Su estructura es prácticamente igual que la de su planeta vecino, pero con un manto mayor y una envoltura gaseosa menor. Es posible que en el manto se den las condiciones para que el carbono se disocie del metano y forme cristales de diamante que se precipitan hacia el núcleo.

Al ser el planeta más alejado del Sol, el flujo de radiación que recibe es muy bajo, más de novecientas veces menor que el terrestre. La baja temperatura media de su atmósfera es similar a la de Urano, que recibe más del doble de radiación. Esto indica que Neptuno cuenta con una fuente de calor interno más importante, que es probable que provenga del remanente generado por la concentración de materia durante su formación. Es una incógnita por qué Urano no la tiene. En todo caso, el flujo de calor interno de Neptuno explica que su atmósfera sea más dinámica, con vientos que pueden alcanzar los $2\,000\text{ km/h}$, los más fuertes del sistema solar. Su estructura global también consiste en cinturones como en los otros gigantes gaseosos, aunque todavía no se ha estudiado con profundidad.

Como en el caso de Urano, la información recopilada por la nave Voyager 2 es una de las principales fuentes de datos sobre el planeta, ya que es la única que los ha visitado hasta la fecha. Una de las peculiaridades destacadas que detectó en la atmósfera de Neptuno fue una gran mancha oscura. Con una apariencia similar a la Gran Mancha Roja de Júpiter, un estudio más detallado indi-



Los gigantes helados: arriba, recreación de Urano con su sistema de anillos; abajo, montaje generado por ordenador que muestra a Neptuno tal como lo vería una nave que se aproximara a su satélite Tritón.

có que en realidad se trataba de una gran zona de bajas presiones rodeada de vientos que superaban los 2400 km/h. En 1994 dejó de verse, aunque parece que las bajas presiones asociadas habrían persistido. Más tarde se han podido localizar otras manchas oscuras, aunque de menor tamaño. La Voyager 2 también detectó nubes a gran altitud, agrupadas en delgados cinturones alrededor del planeta, proyectando sombras sobre las nubes inferiores. Por debajo existen probablemente más capas de nubes, como en sus planetas vecinos. Todos estos fenómenos meteorológicos tienen lugar en la troposfera, donde la temperatura disminuye con la altitud. Por encima, vuelve a aumentar en la estratosfera hasta los 475 °C, antes de llegar a la termosfera.

Neptuno cuenta con 14 satélites conocidos, el mayor de los cuales es, con diferencia, Tritón. Su masa es más de doscientas veces mayor que la suma del resto. Su radio es algo inferior al de la Luna y cuenta con una tenue atmósfera. En cierta forma es similar a Titán, pero con la mayor parte del nitrógeno y el metano atmosféricos congelados en las zonas polares debido a las menores temperaturas, al menos en la zona polar sur, que fue la única que pudo ser visualizada por la nave Voyager 2. Su superficie es reciente y con pocos cráteres, lo cual indica que existe actividad geológica. Se registró criovulcanismo en forma de géiseres que emitían nitrógeno a varios kilómetros de altitud. También se detectaron largas fallas en la zona ecuatorial, posiblemente generadas por ciclos de congelación y calentamiento. Su órbita retrógrada con una elevada inclinación, de 156,9°, indica que fue capturado. Probablemente en el proceso de captura desplazó los satélites iniciales de Neptuno, que fueron expulsados, colisionaron con el planeta o se desintegraron por las fuerzas de marea. Esa será también la suerte que correrá Tritón dentro de varios millones de años, ya que actualmente las fuerzas de marea lo están frenando y acercando a Neptuno. Cuando se desintegre, sus pedazos formarán un nuevo sistema de anillos alrededor de Neptuno. El radio medio de la órbita de Tritón es de 355 000 km. En los siete satélites más interiores las órbitas tienen bajas excentricidades e inclinaciones, mientras que en los seis exteriores son elevadas, algunas incluso retrógradas.

Compartiendo órbitas con los cuatro satélites interiores existen cinco anillos formando un sistema que fue el último en ser detectado. Los más interiores son oscuros, como los de Urano, probablemente por la erosión de flujos de partículas asociadas al campo magnético. El exterior es azul brillante pero no está completo, sino que forma arcos. El campo magnético de Neptuno es similar al de Urano, pero con una forma más parecida al del resto de planetas, al ser su eje de rotación menos inclinado. Encierra, no obstante, una cierta complejidad, como el de su planeta vecino. Para empezar, no es un dipolo perfecto y su eje principal está desplazado respecto al centro una distancia igual a la mitad del radio del planeta, e inclinado unos 47° respecto al eje de rotación. En todo caso, en torno a los polos magnéticos también forma auroras y fenómenos similares a los que se dan en otros gigantes gaseosos.

CASI PLANETAS: PLUTÓN Y OTROS PLANETAS ENANOS

Plutón fue identificado en 1930, recibiendo automáticamente el estatus de planeta. Durante décadas se consideró que el sistema solar tenía nueve planetas. La órbita plutoniana tiene una elevada excentricidad, de 24,4%, oscilando su distancia al Sol entre los 4435 y los 7304 millones de kilómetros (perihelio y afelio, respectivamente). Durante 20 de los 248 años de su periodo está más cerca del Sol que Neptuno, lo que sucedió entre 1979 y 1999. Las órbitas de los dos planetas no coinciden en ningún punto, ni siquiera se acercan, debido a la elevada inclinación orbital plutoniana, de 17,2°. Además, ambos planetas tienen una resonancia orbital 2:3, que confiere al sistema gran estabilidad. Es decir, por cada vuelta de Plutón, Neptuno completa una y media. Cuando el primero está en su perihelio, el segundo se encuentra la mitad de las veces a una gran distancia por delante, y la otra mitad, a una gran distancia por detrás. Esto tiene como consecuencia que la separación mínima entre ambos es de 17 UA, mayor que la separación mínima entre Plutón y Urano, de 11 UA. La masa de Plutón no fue conocida con precisión hasta 1978, cuando se des-

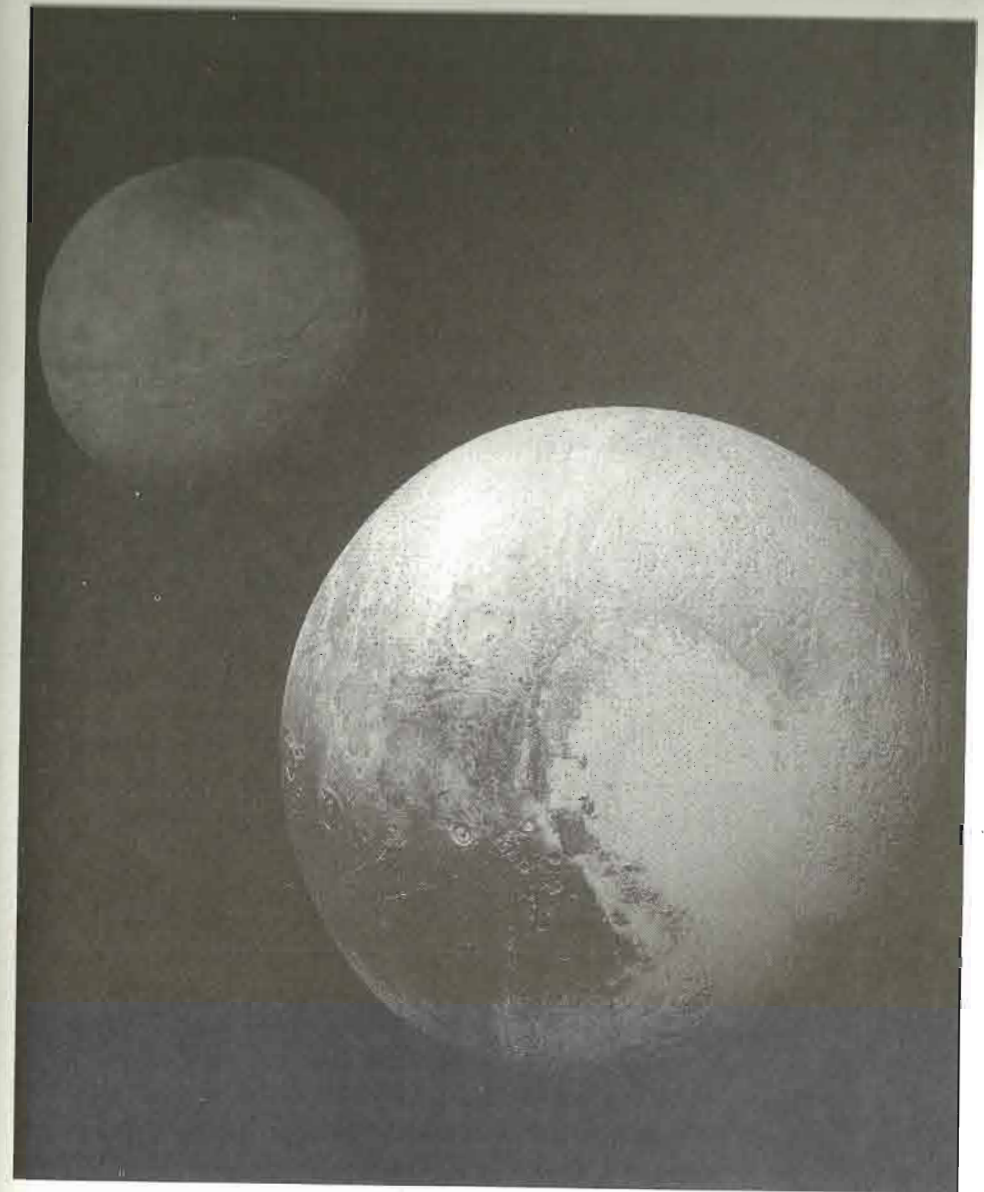
cubrió su satélite, Caronte. Resultó ser mucho más pequeña de lo que se había creído, un 5% de la de Mercurio. Plutón y Caronte rotan en torno a un centro de masas situado cerca del primero, presentándose la misma cara.

El estatus de Plutón como planeta no peligró hasta la década de 1990, cuando se empezaron a encontrar cuerpos en la misma región y más allá. Algunos presentaban también órbitas muy excéntricas e inclinadas, así como fenómenos de resonancia con Neptuno. Esto llevó a algunos astrónomos a considerar a Plutón como el mayor de una serie de cuerpos que recibieron el nombre de *plutinos*. En la década siguiente se hallaron algunos con masas comparables a la de Plutón. Ante la previsión de seguir descubriendo más, se planteaba la duda de si catalogarlos a todos como planetas, o descatalogar a Plutón. No era una situación nueva, ya que dos siglos atrás había ocurrido algo similar con el cinturón de asteroides. Al descubrimiento de Ceres en 1801 le siguieron múltiples descubrimientos de cuerpos orbitando alrededor del Sol entre las órbitas de Marte y Júpiter. Durante décadas se les llamó *planetas*, hasta que su número superó la veintena y se les empezó a llamar *asteroides*.

En la asamblea general de la Unión Astronómica Internacional de 2006 se creó una nueva categoría llamada *planeta enano*, en la que se incluye a Plutón, Makemake y Haumea (en el cinturón de Kuiper), Eris (el más lejano con diferencia) y el ya conocido Ceres (en el cinturón de asteroides). Se resolvió que un planeta es un cuerpo que orbita alrededor del Sol y tiene masa suficiente para haber adquirido forma casi esférica. La principal diferencia que presentan los planetas enanos es que no han limpiado la región próxima a su órbita. Todos los demás cuerpos que orbitan alrededor del Sol se denominan *cuerpos menores del sistema solar*.

LOS CONFINES DEL SISTEMA SOLAR

Plutón y los plutinos se encuentran en el límite interior del cinturón de Kuiper. Se trata de una región que se extiende desde la órbita de Neptuno (30,1 UA) hasta una cincuentena de unida-



Composición fotográfica con Plutón (en primer plano) y su luna Caronte. Aunque la distancia que separa a ambos astros no se muestra aquí a escala, sus tamaños relativos son más o menos reales. Ambas imágenes han sido procesadas siguiendo la misma técnica para poder comparar las propiedades de sus superficies.

des astronómicas del Sol y está poblada por cuerpos menores. Sus órbitas tienen importantes excentricidades e inclinaciones, pero no son extremas. Su masa total es de 20 a 200 veces mayor que la del cinturón de asteroides. Está formado básicamente por cuerpos que no llegaron a aglutinarse como planetas durante la formación del sistema solar. La mayoría son pequeños cuerpos irregulares compuestos de metano, amoníaco y agua congelados, pero también hay cuerpos mayores. Tras la formación de los planetas, estos cuerpos estaban concentrados en una región entre la órbita actual de Neptuno y la de entonces, más cercana al Sol. Al interactuar con los planetas, algunos se desplazaron a posiciones más cercanas, al mismo tiempo que los planetas se desplazaron a órbitas más lejanas. En este ajuste, en algún momento se llegó a una resonancia 2:1 entre los periodos orbitales de Júpiter y Saturno. Esto provocó una expansión de las órbitas de Urano y Neptuno, entrando de lleno el segundo en la región poblada por los cuerpos menores. La presencia del planeta perturbó enormemente sus trayectorias, adquiriendo muchas de sus órbitas excentricidades e inclinaciones. Aquellos que se estabilizaron en órbitas que minimizaban la interacción gravitacional con Neptuno siguen allí en la actualidad, como Plutón y los plutinos, formando el actual cinturón de Kuiper. Se cree que gran parte de los cuerpos fueron enviados a zonas aún más exteriores, formando las regiones teóricas conocidas como *disco disperso* y *nube de Oort*.

El disco disperso estaría formado por aquellos cuerpos que fueron enviados directamente a regiones más exteriores. Tienen órbitas con parámetros heterogéneos, y excentricidades e inclinaciones mayores que el cinturón de Kuiper. Algunas pueden incluso sean inestables y estén destinadas a alejarse progresivamente del centro del sistema solar. Actualmente están identificados como pertenecientes al disco disperso algo menos de cien cuerpos, el más grande de los cuales es Eris, el más masivo de los planetas enanos. En la región interior del cinturón de Kuiper, pero con órbitas tan inclinadas y excéntricas como las de los cuerpos del disco disperso, existen otros cuerpos llamados *centauros*. Estos cuerpos tendrían también su origen en el cinturón de Kuiper,

VISITANTES RECURRENTES: LOS COMETAS

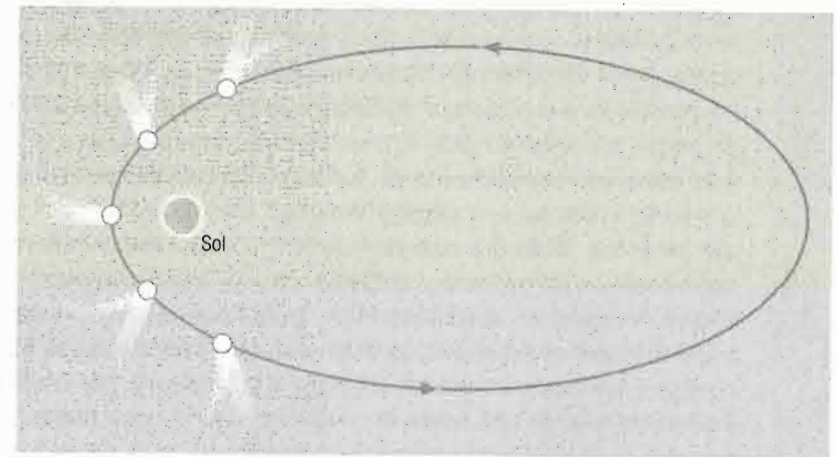
Los cometas son conocidos desde la antigüedad por su forma característica. Tienen una cola que apunta en sentido contrario al Sol y que va aumentando de tamaño cuando el cometa se aproxima a este. Los cometas son cuerpos constituidos por hielo, polvo y rocas que pueden tener órbitas elípticas con grandes excentricidades, llegando a ser a veces parabólicas e hiperbólicas. Una de las primeras personas en predecir la órbita de un cometa y determinar cuándo volvería a ser visto desde la Tierra fue el astrónomo inglés Edmund Halley, en cuyo honor se nombró el citado cometa.

Estelas en el espacio

Cuando los cometas se aproximan al Sol, el hielo sublima. A partir de 5-10 UA desarrollan una atmósfera de gas y polvo que envuelve al núcleo. Al acercarse más, el viento solar modela la atmósfera convirtiéndola en la característica cola dispuesta en sentido contrario al Sol. La parte gaseosa se ioniza y apunta directamente en sentido contrario, mientras que el polvo conserva una cierta inercia.

Familias de cometas

Los cometas se pueden clasificar en varios tipos según su órbita, tamaño, edad o composición. Especialmente interesantes son los cometas de periodo largo, cuyas órbitas altamente excéntricas pueden sobrepasar la heliosfera. Por este motivo es posible encontrar en ellos polvo interestelar.



Esquema de las direcciones que adoptan las colas de gas y polvo de un cometa a lo largo de su órbita.

pero no está claro cómo clasificarlos. De hecho, el disco disperso se contempla en el marco de teorías relativamente nuevas y no está claramente delimitado, al no haber datos suficientes. Podría extenderse hasta centenares de unidades astronómicas.

La nube de Oort es una región teórica que surgió para resolver

la paradoja de la existencia de los cometas de periodo largo. Cada vez que un cometa se aproxima al Sol, se desprende gradualmente de parte de los compuestos volátiles que lo forman a través de su cola. El problema está en que muchos tendrían que haber de-

saparecido por completo, teniendo en cuenta la edad del sistema solar. La teoría sostiene que los cometas no pueden haberse formado en su órbita actual y que deben de haber permanecido durante largos periodos en regiones lejanas. De vez en cuando, sucesos extraordinarios ocasionarían que algunos se dirigieran hacia regiones más interiores tomando trayectorias elípticas, parabólicas o hiperbólicas. Las fuentes de los cometas de periodo corto y medio serían el cinturón de Kuiper y el disco disperso. La fuente de los cometas de periodo largo sería la nube de Oort. No está claro cómo se habría formado, pero podría tratarse de cuerpos del cinturón de Kuiper original desplazados durante la migración de los planetas. A diferencia de los cuerpos del disco disperso, no habrían sido enviados directamente hacia el exterior, sino que inicialmente se habrían dirigido hacia el interior y, tras interactuar con Júpiter, habrían sido expulsados a regiones remotas. El límite exterior de la nube de Oort se encontraría a decenas de miles de unidades astronómicas, superando en varios órdenes de magnitud el de la heliosfera. Según algunas estimaciones estadísticas, podría albergar más de un billón de cuerpos, con una masa total superior a la terrestre. Sin embargo, hasta hoy solo se han observado directamente unos pocos cuerpos que podrían formar parte de la nube.

Finalmente, hay que tener en cuenta que todos los cuerpos del sistema solar situados más allá de la órbita de Neptuno son muy difíciles de detectar con la tecnología actual. Incluso es posible

que los años venideros nos deparen sorpresas que modifiquen sustancialmente nuestra visión del sistema solar. En este sentido, cabe destacar la reciente publicación de un artículo señalando la posible existencia de un cuerpo varias veces más masivo que la Tierra orbitando alrededor del Sol a mayor distancia que Neptuno. La existencia de este posible cuerpo, aún no detectado, explicaría ciertas anomalías que se han registrado en el movimiento de varios cuerpos menores. Aunque se está usando la palabra *planeta* para referirse a él, sus características orbitales diferirían bastante de las de los planetas actuales, siendo su órbita mucho más excéntrica y lejana. De confirmarse la existencia de un cuerpo tan masivo que no había sido detectado hasta ahora, se abriría la puerta a un gran número de nuevas teorías y se daría un gran impulso al interés por ampliar nuestros conocimientos sobre los confines del sistema solar.

No sabemos por qué nacemos en el mundo, pero podemos tratar de averiguar qué clase de mundo es.

EDWIN HUBBLE

La exploración del sistema solar

«Un pequeño paso para un hombre, un gran salto para la humanidad.» Estas fueron las primeras palabras que pronunció Neil Armstrong tras pisar la superficie lunar. Es probable que no apreciemos la magnitud de su significado, al igual que los primeros homínidos que usaron un tronco para cruzar un río difícilmente podían imaginar las circunnavegaciones terrestres.

Toda la información que se tenía sobre el sistema solar y el universo en general antes de la primera mitad del siglo xx se obtuvo a través de telescopios. Gracias a siglos de observaciones se sabía que los planetas orbitaban alrededor del Sol en trayectorias elípticas. Se habían identificado sus mayores satélites e incluso algunas de sus peculiaridades, como los anillos de Saturno o las manchas de Júpiter. Se había localizado también Plutón, considerado entonces un planeta, y formaciones como el cinturón de asteroides. Desde entonces, la exploración espacial ha facilitado innumerables datos nuevos que solo pueden obtenerse *in situ*, mejorando sustancialmente nuestros conocimientos.

Tras la Segunda Guerra Mundial, Estados Unidos y la Unión Soviética se erigieron en las dos grandes potencias mundiales. Entre ambos países se estableció una clara competencia, una de cuyas facetas más destacadas fue la carrera espacial. Desde la puesta en órbita en 1957 del primer satélite artificial por la Unión Soviética, Sputnik 1, se sucedieron éxitos y fracasos por parte de los dos países. Tras las misiones lunares, se estableció una tímida colaboración entre ambas naciones, que se extendió posteriormente a otras y se ha visto multiplicada desde

la desintegración de la Unión Soviética. Uno de los exponentes más claros de esta colaboración en la actualidad es la Estación Espacial Internacional (ISS, por sus siglas en inglés). Aparte de esta estación, más de mil satélites artificiales están orbitando alrededor de la Tierra. Sus usos van desde la geolocalización a la observación espacial.

Desde los inicios de la exploración espacial se han enviado misiones no tripuladas a otros planetas. Ya antes de la llegada a la Luna de la primera misión tripulada, en 1969, tanto Estados Unidos como la Unión Soviética habían enviado sus primeras misiones a Venus y Marte. En los años siguientes Estados Unidos envió naves que visitaron Mercurio, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. En 1989 se envió la misión Galileo al sistema de Júpiter y, posteriormente, la Cassini-Huygens al sistema de Saturno, ambas con colaboración internacional. Una de las misiones futuras que tiene más interés es la misión tripulada a Marte.

TODOS LOS MEDIOS PARA ESCRUTAR EL CIELO

Los primeros telescopios usados por Galileo y Kepler tenían las lentes, objetivo y ocular, alineadas. El primer telescopio reflector del que se tiene constancia fue construido por Newton a finales del siglo XVIII. Incorporaba un pequeño espejo plano para dirigir la luz al ocular, situado en el lateral del telescopio. Desde entonces, las superficies reflectoras se han perfeccionado enormemente con nuevos materiales y formas. Casi todos los grandes telescopios ópticos actuales son reflectores. Por otro lado, desde mediados del siglo XX se vienen usando radiotelescopios para captar ondas electromagnéticas con frecuencias distintas a la de la luz visible. Son posibles gracias a uno de los hitos más importantes en la historia de la óptica, que se produjo en la segunda mitad del siglo XIX, cuando Maxwell formuló su teoría según la cual la luz era una onda electromagnética.

Un punto de inflexión en la observación espacial fue la puesta en órbita terrestre de telescopios para eliminar los efectos distorsionadores de la atmósfera. Uno de los más conocidos es el

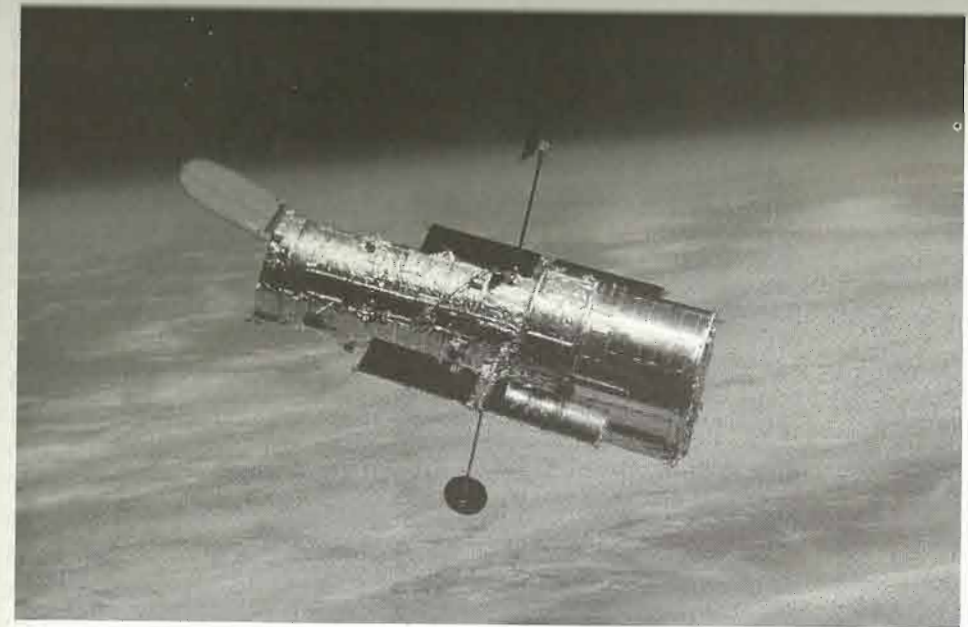
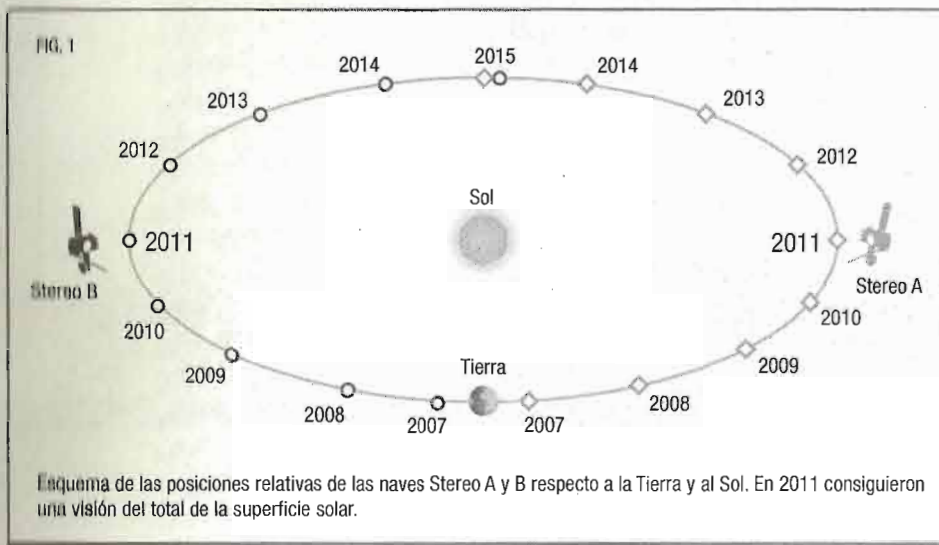
Hubble (véase la imagen superior de la pág. 145), capaz de captar las perturbaciones atmosféricas de Júpiter o la traslucidez de los anillos de Saturno. Este telescopio, sensible a la radiación visible, ultravioleta e infrarroja, se lanzó en 1990. Un año más tarde le siguió el Compton, sensible a la radiación gamma y a algunas frecuencias de rayos X. Tras quedar inoperativo por fallar su sistema de dirección, se destruyó forzando su abrasión con la atmósfera en el año 2000. En 1999 y 2003 fueron puestos en órbita el Chandra y el Spitzer, respectivamente. El primero se centra en las frecuencias de los rayos X y el segundo, en la radiación infrarroja. En conjunto, constituyen el programa de grandes observatorios de la agencia espacial estadounidense NASA. Cada uno en su parte del espectro electromagnético ha aportado información clave en la comprensión del universo. Gracias a su trabajo conjunto, se tiene una imagen más completa para entender mejor la formación y evolución de las galaxias. En ocasiones se han dirigido también a los planetas del sistema solar, identificando tormentas en Neptuno o un nuevo anillo alrededor de Saturno.

Desde la década de 1990 se enviaron al espacio otros observatorios, muchos de los cuales están centrados en la actividad solar. En 1991 se puso en órbita terrestre el observatorio espacial Yohkoh, también conocido como SOLAR A. Se trataba de una misión del ISAS, el Instituto de Ciencia Aeronáutica y Espacial de Japón, con colaboración internacional. Estuvo operativo durante más de una década, siendo durante años el único telescopio de rayos X que monitorizaba la actividad solar. La Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, JAXA (integrada por el ISAS y otros dos organismos), ha puesto también en órbita terrestre el observatorio espacial Hinode (conocido formalmente como SOLAR-B), también con colaboración internacional. Lanzado en 2006, está en una órbita sincrónica al Sol para posibilitar su observación continua. Es decir, la inclinación de su plano orbital varía anualmente de tal forma que su intersección con el plano orbital terrestre nunca pasa por el Sol, evitando así que sea eclipsado por la Tierra. Gracias a su telescopio solar, se han captado imágenes de gran precisión.

Por su parte, la Agencia Espacial Europea (ESA) y la NASA lanzaron en 1991 la misión Ulysses, que ha realizado tres periodos

de escaneo cercano al Sol en 1994-1995, 2000-2001 y 2007-2008. Se dio a la nave una órbita solar muy excéntrica y con una elevada inclinación, de unos ochenta grados, para poder estudiar sus zonas polares. Para conseguir estas características orbitales, se dirigió inicialmente a Júpiter, bordeándolo y adquiriendo, gracias a su gravedad, una velocidad suficiente en dirección perpendicular al plano orbital terrestre. Ambas agencias lanzaron también conjuntamente el observatorio SOHO en 1995, que ha estado operativo más de veinte años, proporcionando datos sobre el viento solar de forma casi instantánea. Fue enviado a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra en dirección al Sol, donde las gravedades de ambos se anulan. Dos años más tarde, la NASA envió a ese mismo lugar la nave ACE para estudiar la composición del viento.

En 2006, la NASA empezó una de las misiones de observación solar más interesantes que se han realizado hasta el momento. Consta de dos naves, Stereo A y B, orbitando alrededor del Sol en distintas posiciones para facilitar así imágenes estereoscópicas de fenómenos como las eyecciones de masa solar. Las naves orbitan a una distancia similar a la terrestre, pero una tiene un periodo menor, de 347 días, y la otra mayor, de 387 días (figura 1). En conse-



Arriba, el telescopio espacial Hubble. Las antenas de la fotografía inferior pertenecen al conjunto denominado ALMA, un radiotelescopio capaz de detectar luz de longitudes de onda largas, procedente de galaxias muy lejanas. Este gran proyecto astronómico pretende ampliar los conocimientos sobre las nubes moleculares, la formación estelar y el origen del universo.

cuencia, cada año se fueron alejando un poco de la Tierra en sentidos contrarios. En 2015 se encontraron ya detrás del Sol. Como sus velocidades son distintas de la terrestre, irán ajustando sus órbitas, una aproximándose y la otra alejándose.

Después de las naves Stereo, la NASA lanzó los observatorios Kepler, WISE y SDO, que utilizan las técnicas más novedosas en el procesado de imágenes. El Kepler está en órbita solar desde 2009, aunque cuatro años más tarde quedó inoperativo por un fallo en su sistema de dirección. Su misión consistía en la búsqueda de planetas extrasolares, especialmente los similares a la Tierra. Mediante el análisis automático de imágenes, intentaba detectar pequeñas variaciones en la luminosidad de centenares de miles de estrellas para identificar posibles tránsitos planetarios. Encontró 2 740 candidatos, de los que se han confirmado 114 planetas en 69 sistemas estelares. Según sus datos, se estima que solo en la Vía Láctea hay decenas de miles de millones de planetas de tamaño similar al nuestro. El WISE está en órbita terrestre también desde 2009 y su misión consiste en el mapeo de todo el espacio en varias frecuencias de radiación infrarroja. Aparte de descubrir un gran número de estrellas, también ha encontrado decenas de miles de asteroides, incluyendo un pequeño troyano en la órbita terrestre. Ha generado imágenes con una resolución impresionante, que se pueden contemplar en la web de la NASA. El objetivo del SDO, en órbita terrestre desde 2010, consiste en la observación solar. Tomando imágenes de altísima calidad en cortos intervalos y distintas frecuencias, ha generado impresionantes vídeos, que también se pueden ver en Internet. Gracias a ellos, se podrá comprender mejor el funcionamiento del campo magnético solar.

Aunque los observatorios espaciales son decisivos en el avance del conocimiento astronómico, los telescopios terrestres siguen teniendo mucha importancia para la observación del sistema solar. Se acostumbra a situarlos en lugares con cierta altura y poco poblados, para minimizar las interferencias atmosféricas y lumínicas. Seleccionando adecuadamente su ubicación se puede alcanzar una elevadísima calidad. Su limitación principal es que su campo de visión está acotado por la propia Tierra. Para

posibilitar la observación a todas horas en todas direcciones es necesaria una amplia red de observatorios repartida por todo el planeta. Dos de los más importantes son el Observatorio del Roque de los Muchachos, en Canarias, y el Observatorio de Mauna Kea, en Hawái. En el hemisferio sur, donde destaca el Observatorio Astronómico Sudafricano, el número de telescopios siempre ha sido menor. Para compensarlo, la Organización Europea para la Observación Astronómica en el Hemisferio Austral (ESO) ha construido en Chile muchos de los más grandes y avanzados telescopios. En el Observatorio Paranal, en el desierto de Atacama, el VLT (*Very Large Telescope*) consiste en un sistema de cuatro telescopios que pueden operar conjuntamente. Relativamente cerca de allí, el ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) consta de decenas de radiotelescopios que realizan también operaciones conjuntas (véase la fotografía inferior de la pág. 145). Completado en 2013 con la colaboración de numerosos países, se trata del mayor proyecto astronómico llevado a cabo hasta la fecha.

OBJETIVO: ALCANZAR LA LUNA

Si bien mediante la observación se puede conseguir mucha información, hay datos que solo pueden obtenerse *in situ* a través de la exploración espacial. Esta viene efectuándose desde hace solamente unas décadas, y tiene uno de sus hitos más destacados en la misión Apolo 11, que supuso la llegada del ser humano a la Luna en 1969. Aunque este honor correspondió a Estados Unidos, la Unión Soviética fue pionera en los inicios de la carrera espacial. Tras la Segunda Guerra Mundial, ambos países estaban en una clara competencia para erigirse en primera potencia mundial. El lanzamiento de la bomba atómica en 1945, al final de la guerra, había colocado a Estados Unidos en una situación de fuerza. La Unión Soviética consiguió desarrollarla tan solo cuatro años más tarde, equilibrando así la balanza. El dominio de la balística podría volver a desequilibrarla, así que muchos de los ingenieros alemanes que habían desarrollado los

misiles de largo alcance V2 fueron reclutados por ambos países. La tecnología de propulsión estaba solo a un paso de conseguir lanzar objetos a velocidades orbitales.

En 1957, la Unión Soviética fue el primer país en lanzar un satélite artificial, el Sputnik 1, que logró completar unas 1 400 vueltas a la Tierra en 92 días. Ese mismo año se lanzó el Sputnik 2, con el primer ser vivo a bordo, la perra Laika, que murió por sobrecalentamiento de la nave. El Sputnik 5 fue el primero en regresar a la Tierra con su tripulación a salvo, concretamente dos perros, de-

cenas de roedores y diversas plantas. Desde entonces hasta 1975, la Unión Soviética llevó a cabo un total de 783 lanzamientos de satélites, con una masa media de 400 kg, en el marco del programa Cosmos. También fue el primer país en poner humanos en órbita. La nave Vostok 1, lanzada en

YURI GAGARIN

1961 con Yuri Gagarin a bordo, realizó el primer vuelo orbital tripulado, que duró 89 minutos. Dos años más tarde, la Vostok 5 fijó el nuevo récord en cinco días. En 1965 se efectuaron las primeras misiones de las naves Vosjod, con varios tripulantes, en las que tuvo lugar el primer paseo espacial, que duró unos diez minutos. Dos años después se iniciaron los vuelos con las naves Soyuz, que han tenido un gran rendimiento hasta nuestros días. Con capacidad para tres tripulantes y flexibilidad para distintas misiones, han realizado más de cien vuelos tripulados, entre los que destacan los viajes a las estaciones orbitales Salyut, Mir e ISS.

Los soviéticos fueron también los primeros en enviar naves no tripuladas a la Luna. En un solo año, 1959, enviaron las tres primeras. La Luna 1 pasó a solo 6000 km de nuestro satélite, la Luna 2 fue la primera en impactar en su superficie y la Luna 3 consiguió tomar las primeras imágenes de su cara oculta. Tras varios intentos fallidos, la nave Luna 9 alunizó suavemente y envió las primeras imágenes desde la superficie en 1966. Ese mismo año la Luna 10 orbitó a 350 km de nuestro satélite, manteniendo el contacto durante las 460 vueltas que completó en dos meses. A pesar del eclipse mediático que supusieron

las misiones tripuladas estadounidenses, el programa soviético de misiones no tripuladas siguió acumulando éxitos hasta 1976. Varias naves alunizaron y regresaron a la Tierra con muestras, una de ellas incluso con material recogido del subsuelo a dos metros de profundidad.

En los inicios de la carrera espacial, Estados Unidos había ido un paso por detrás de los soviéticos. La NASA se creó poco después del lanzamiento del Sputnik 1, enviando inmediatamente las primeras naves del programa Pioneer. La Pioneer 4 realizó con éxito un sobrevuelo lunar en 1959. La Pioneer 5 se dirigió al espacio entre la Tierra y Venus, situando el récord de distancia de comunicación en 22,5 millones de kilómetros antes de perder contacto. Las primeras naves orbitales tripuladas estadounidenses fueron las del programa Mercury en 1962 y 1963. Seguidamente, en el marco del programa Gemini se empezó a desarrollar la tecnología que permitiría llevar una misión tripulada a la Luna. En 1966, durante la misión Gemini 8, los estadounidenses fueron los primeros en realizar un acoplamiento de dos naves en órbita.

El programa Apollo fue sin duda el de mayor impacto mediático, ya que consiguió llevar a dos hombres a la superficie lunar. La primera misión en conseguirlo fue la del Apollo 11 en 1969, retransmitida en directo a todo el mundo y seguida por unos seiscientos millones de personas. Le sucedieron otras cinco, en las que se recopilaron numerosas muestras y se realizaron todo tipo de experimentos. El programa Apollo supuso un gran avance en multitud de tecnologías, no solo de propulsión, sino también de computación y comunicación. A las misiones lunares les sucedió el programa Apollo-SL, que puso en órbita el Skylab, la primera estación espacial estadounidense. Los soviéticos se les habían adelantado esta vez, poniendo en órbita la estación Salyut en 1971. Ese mismo año fue visitada por dos naves Soyuz antes de que se abrasaran en su reentrada en la atmósfera.

La última misión Apollo tuvo lugar en 1975 y, simbólicamente, fue la primera misión conjunta entre Estados Unidos y la Unión Soviética. Bautizada con el nombre Apollo-Soyuz, consistió en el acoplamiento en el espacio de naves de ambos países. La colaboración internacional ha ido aumentando desde entonces,

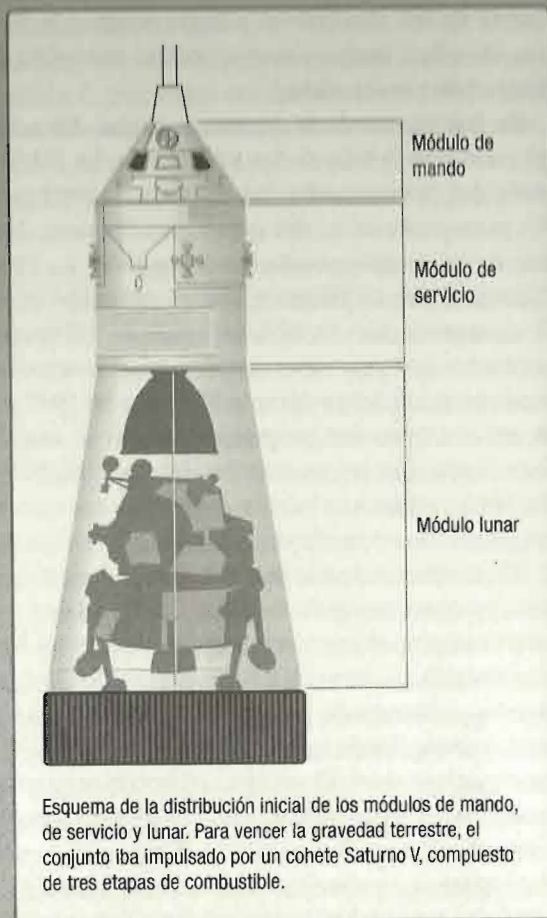
Aunque solo una persona iba a bordo de la nave, fueron necesarias decenas de miles para que fuera un éxito.

EL HOMBRE EN LA LUNA: LA MISIÓN APOLO 11

El 16 de julio de 1969, la nave con los astronautas Neil Armstrong, Edwin Aldrin y Michael Collins fue lanzada mediante un cohete Saturno V, que constaba de tres etapas de combustible. Las dos primeras se consumieron enteras y se separaron antes de ponerse en órbita. La tercera se consumió para dirigir la nave hacia la Luna después de completar una órbita completa a la Tierra. Tras separarse esta última etapa, se liberó el módulo lunar, que había permanecido tras el módulo de mando/servicio por cuestiones aerodinámicas (véase la figura). Ambos módulos se acoplaron por la parte delantera.

La llegada a la Luna

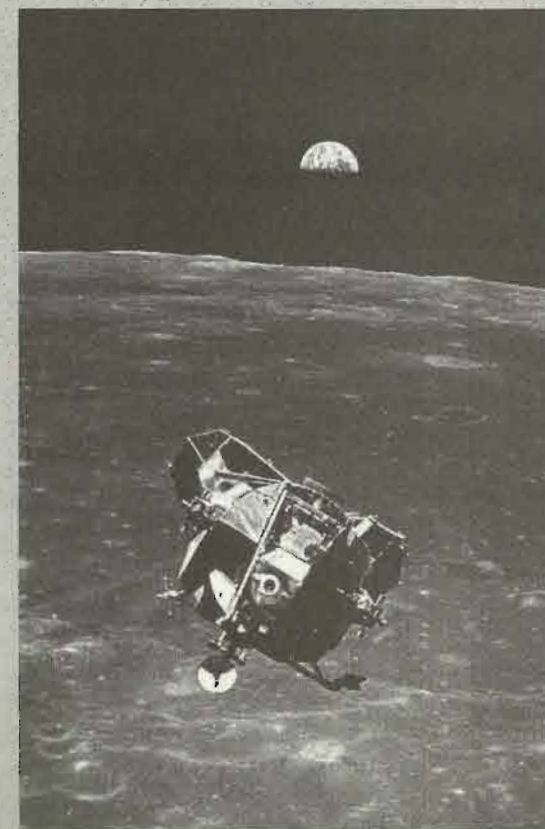
La aproximación a la Luna duró unos tres días. Se siguió una trayectoria de regreso libre que permitía pasar por detrás de la Luna y, usando su gravedad, volver a la Tierra sin necesidad de encender el propulsor del módulo de mando/servicio. Este fue encendido en las proximidades de nuestro satélite, para frenar y entrar en órbita. Tras diecinueve órbitas, el módulo lunar, con Armstrong y Aldrin, se despegó del módulo de mando/servicio en dirección a la superficie. Se frenó con el propulsor principal y se dirigió con los de posición, alunizando suavemente en una zona distinta de la prevista inicialmente. Permanecieron más de veinte horas en la Luna realizando las tareas que tenían encomendadas, tras lo cual el módulo lunar se elevó de nuevo dejando atrás todos los equipos innecesarios. Después de sincronizar su vuelo al del módulo de mando/servicio, se acoplaron de nuevo dejando caer la etapa de combustible usada para ascender.



Esquema de la distribución inicial de los módulos de mando, de servicio y lunar. Para vencer la gravedad terrestre, el conjunto iba impulsado por un cohete Saturno V, compuesto de tres etapas de combustible.

La vuelta a casa

Una vez trasladadas las muestras, se abandonó el módulo lunar, encendiendo el propulsor del módulo de mando/servicio para tomar la trayectoria de regreso a la Tierra. Tras otros dos días y medio, el módulo de mando con la tripulación dentro se separó del módulo de servicio en las cercanías de nuestro planeta. El frenado necesario para la reentrada fue proporcionado por el rozamiento de la atmósfera. Durante el proceso, la energía cinética se transformó en calor, formando una pantalla de aire ionizado que impidió las comunicaciones durante unos minutos. Finalmente, tras abrirse los paracaídas, el módulo de mando amerizó suavemente el 24 de julio.



A la izquierda, despegue del cohete Saturno V. La fotografía de la derecha muestra el módulo lunar visto desde el módulo de mando/servicio, antes de acoplarse de nuevo tras el alunizaje.

Creo que vamos a la Luna porque está en la naturaleza del ser humano hacer frente a los retos.

NEIL ARMSTRONG

sobre todo en los proyectos complejos como las estaciones espaciales. Un año después de la puesta en órbita del núcleo de la estación espacial Mir, aún en época soviética, se acopló un módulo diseñado con colaboración europea. Muchos astronautas de otros países visitaron esa estación, sobre todo tras la desintegración de la Unión Soviética. Incluso se adaptó para recibir los transbordadores estadounidenses dentro del programa Shuttle-Mir. Este proyecto preparó el terreno para la Estación Espacial Internacional (ISS), que se puso en funcionamiento en 1998, tres años antes de que se forzara la abrasión de la Mir por efecto de la fricción con la atmósfera. Esta nueva estación cuenta con la participación de las principales agencias espaciales y es el objeto artificial más grande que orbita alrededor de la Tierra.

LAS MISIONES PLANETARIAS

Tras el éxito inicial de las misiones lunares, se empezaron a enviar misiones no tripuladas a otros planetas, que han seguido hasta la actualidad. Los primeros pasos se dieron ya antes de que los estadounidenses lograran llevar seres humanos a nuestro satélite.

La exploración de la vecindad...

En 1961, poco después de enviar sus primeras misiones lunares, los soviéticos enviaron la primera misión planetaria con la intención de sobrevolar Venus. Sin embargo, la nave Venera 1 sufrió una avería y la primera en lograr el objetivo fue la estadounidense Mariner 2, en 1962. Los soviéticos volvieron a adelantarse, siendo los primeros en colocar un objeto de fabricación humana en la superficie de otro planeta, la Venera 3, que impactó con Venus en 1965. La siguieron otras tres naves,

que enviaron datos sobre temperaturas, densidades y presiones atmosféricas, determinando también su composición. La primera nave en realizar un aterrizaje controlado en Venus fue la Venera 7, siendo además la primera que lo hacía en otro planeta. Esta operación tuvo un enorme mérito técnico, ya que las naves adquieren una gran velocidad durante el viaje a Venus, por estar más cerca del Sol que la Tierra. Además, el frenado atmosférico no es una buena opción en su atmósfera densa y variable. Las misiones Venera se sucedieron con éxito hasta 1983. Sirvieron para recopilar multitud de datos sobre la atmósfera, la ionosfera y la magnetosfera. También tomaron imágenes, realizaron mapeados con radar e incluso hicieron un análisis de la corteza con espectrómetro de rayos gamma. Fueron relevadas por el programa Vega, que consistió en un par de globos aerostáticos que flotaron a unos 50 km de la superficie durante decenas de horas, cubriendo una tercera parte del perímetro planetario. En 1978 la NASA envió la misión Pioneer Venus, que contaba con una nave orbital y una multisonda con cuatro partes. Tras entrar en la atmósfera de Venus, una de ellas sobrevivió inesperadamente al descenso, transmitiendo durante aproximadamente una hora desde la superficie. La nave orbital funcionó hasta agotar su combustible, desintegrándose finalmente en la atmósfera en 1992. En 1989 la NASA envió también a Venus la nave Magallanes, que orbitó durante cuatro años antes de desintegrarse en la atmósfera. Realizó mapas con radar del 98% del planeta con una gran precisión.

Los soviéticos fueron también los primeros en conseguir enviar una nave a las cercanías de Marte. Sin embargo, las comunicaciones de la Mars 1, lanzada en 1962, fallaron a 106,8 millones de kilómetros de la Tierra y la primera nave en transmitir desde las cercanías fue la estadounidense Mariner 4 en 1965. La Mariner 9 fue la primera en orbitar alrededor de otro planeta. En 1971 permaneció un año en órbita marciana, realizando mediciones y cartografiando la superficie. Detectó una espectacular tormenta de polvo, canales que parecían redes hídricas y vapor de agua atmosférico. Ese mismo año, los soviéticos enviaron las misiones Mars 2 y Mars 3, que incluían una nave orbital y una sonda de su-

perficie. La sonda de superficie de la primera se estrelló, convirtiéndose en el primer artefacto humano en alcanzarla. La sonda de la segunda consiguió aterrizar y enviar imágenes. En los dos años posteriores, las misiones soviéticas a Marte se sucedieron, con distinta suerte, hasta la Mars 7. En 1975 la NASA envió a Marte las misiones Viking 1 y Viking 2. Cada una constaba de una nave orbital y una sonda de superficie. Fueron las primeras misiones estadounidenses en aterrizar sobre otro planeta. Realizaron multitud de mediciones, incluyendo un estudio biológico con resultados negativos. Las informaciones que recopilaron no fueron superadas hasta décadas más tarde.

Los estadounidenses fueron los primeros en enviar una nave a Mercurio. La Mariner 10, lanzada en 1973 como la última de este programa, utilizó la gravedad de Venus para aproximarse a la órbita de Mercurio, sobre el que realizó tres vuelos, tomando más de 10 000 imágenes. En 1975 se quedó sin combustible suficiente para mantener el control de orientación y hoy sigue a la deriva orbitando alrededor del Sol. Tecnológicamente hablando, las misiones a Mercurio son de las más complicadas, ya que tienen que vencer una mayor gravedad por ser el planeta más cercano al Sol. En términos de combustible son las más costosas, al ser muy grandes los cambios de velocidad que deben hacer las naves para llegar a su órbita. Una vez allí, no resulta nada fácil entrar en órbita alrededor del planeta, por ser su masa relativamente pequeña y no tener atmósfera que pueda ayudar en el frenado. En 2004 la NASA envió la sonda Messenger, que, después de tres sobrevuelos, en 2011 se puso en órbita alrededor de Mercurio, donde permaneció durante cuatro años, antes de precipitarse sobre la superficie del planeta.

...Y de los parientes lejanos

En cuanto al sistema solar exterior, las primeras naves fueron enviadas en el marco del programa estadounidense Pioneer, que había seguido activo tras sus misiones lunares iniciales. En 1972 se lanzó la Pioneer 10, la primera nave en sobrevolar Júpiter y

en cruzar la órbita de Neptuno. Un año más tarde fue lanzada la Pioneer 11, que sobrevoló también Saturno, siendo la primera en hacerlo. En 1977 la NASA envió las naves Voyager 1 y Voyager 2. Ambas sobrevolaron Júpiter y Saturno, y la Voyager 2 visitó además Urano y Neptuno. De especial relevancia son los datos recopilados durante los sobrevuelos de estos dos últimos planetas, ya que hasta ahora es la única nave que los ha visitado y no está previsto enviar otras. Todas estas misiones supusieron una verdadera revolución en el conocimiento de los planetas del sistema solar exterior. Los datos que facilitaron permitieron el estudio de la estructura y composición química de sus atmósferas, así como de su magnetosfera. También posibilitaron el descubrimiento de multitud de nuevos anillos y satélites.

En las últimas décadas se han llevado a cabo complejas misiones para estudiar con más detalle los sistemas de Júpiter y Saturno. En la definición de sus prioridades fueron de vital importancia las informaciones recopiladas en los sobrevuelos de las misiones Pioneer y Voyager. La misión Galileo fue lanzada al sistema de Júpiter en 1989 y llegó a su destino seis años más tarde, tras sobrevolar Venus y la Tierra para usar su gravedad. Se trataba de una misión conjunta entre Estados Unidos y la República Federal de Alemania. Fue la primera nave en orbitar alrededor de Júpiter y envió una sonda a hacer mediciones a su atmósfera. A pesar de tener problemas con la antena principal, pudo enviar información de una calidad sin precedentes. Gracias a ella, se mejoró el conocimiento sobre la extensión y estructura del campo magnético de Júpiter y su relación con los de sus satélites. También se descubrió que los finos anillos de Júpiter estaban formados por polvo procedente de impactos en sus satélites coorbitales. La misión terminó en 2003 con la entrada de la nave en la atmósfera del planeta, con el fin de destruirla y evitar así que pudiera caer en el futuro en alguno de sus satélites y contaminarlo con microorganismos terrestres. En cuanto al sistema de Saturno, la misión conjunta de la NASA y la ESA Cassini-Huygens fue lanzada en 1997. La nave Cassini se convirtió en la primera en orbitar alrededor de Saturno, después de siete años de viaje en los que aprovechó la gravedad de Venus, la

Tierra y Júpiter (figura 2). La sonda Huygens entró en la atmósfera de Titán en 2005, realizando el primer aterrizaje de una sonda en el sistema solar exterior. Está previsto que la misión finalice en septiembre de 2017 con la entrada de la nave en la atmósfera de Saturno para ser destruida.

La primera nave en visitar un cometa fue la Giotto, que se aproximó a menos de 600 km del cometa Halley en 1986, en la que fue la primera misión espacial de la ESA. Desde entonces se han sucedido varias misiones no tripuladas a asteroides y cometas. La primera nave en sobrevolar un asteroide fue la Galileo, camino de Júpiter en 1991, que descubrió un pequeño satélite orbitando alrededor del asteroide. En 1996 la NASA lanzó la misión NEAR Shoemaker para estudiar un asteroide cercano a la Tierra. Se acercó, orbitó a su alrededor varias veces y finalmente aterrizó sobre él en 2001. Dos años más tarde la JAXA envió su misión Hayabusa (anteriormente denominada MUSES-C), que visitó un

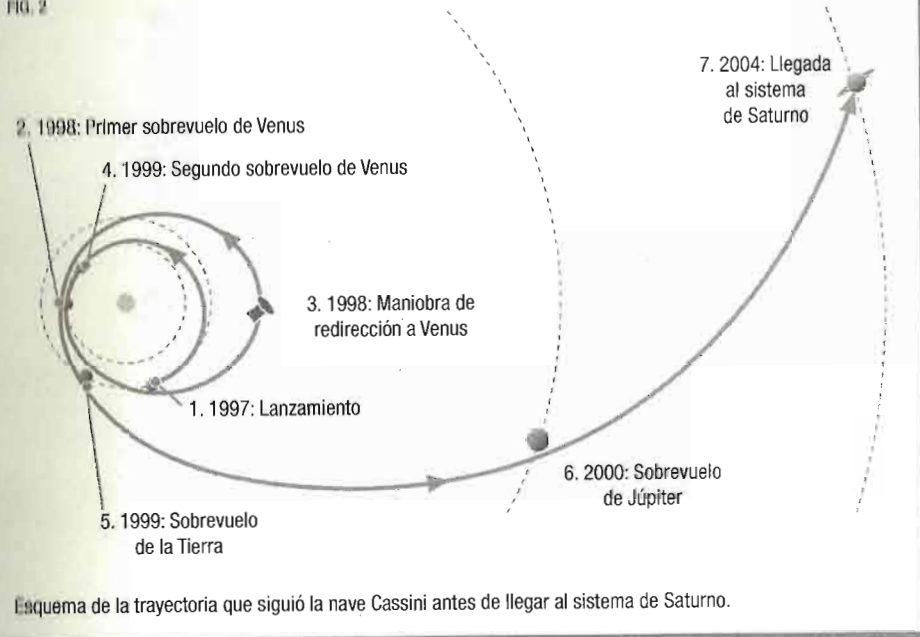
asteroide cercano a la Tierra y regresó en 2010. La pequeña sonda Minerva, que se habría desplazado por la superficie, no se liberó correctamente y se perdió en el espacio. Aun así, la misión pudo estudiar la rotación, densidad, forma y composición del asteroide, recogiendo incluso muestras desde la nave.

La primera misión en volver a la Tierra con muestras de polvo de la cola de un cometa fue la Stardust, de la NASA. El retorno se produjo en 2006, dos años después del regreso de la misión Génesis. Esta última, también de la NASA, había sido la primera en recolectar muestras extraterrestres más allá de la órbita lunar. Concretamente fueron muestras de viento solar exterior a la magnetosfera terrestre. Durante su reentrada falló el paracaídas principal y se estrelló en la superficie. Por fortuna, algunas muestras se pudieron rescatar y se siguen estudiando. En la actualidad hay varias misiones en curso cuyo destino son cometas. La nave Rosetta, de la ESA, fue enviada en 2004 a un cometa de periodo corto. Diez años más tarde entró en su órbita y liberó la sonda Philae, que aterrizó sobre él. Sin embargo, Philae acabó a 1 km de la posición prevista, en una zona con poca exposición solar, de manera que al cabo de dos días había agotado sus baterías. Al cabo de unos meses la sonda se dio por perdida. La nave Deep Impact, de la NASA, se envió en 2005 también a un cometa de periodo corto. Ese mismo año llegó y envió una sonda para producir un impacto violento, que originó un cráter y levantó una gran nube de polvo brillante. En 2016 todavía sigue activa visitando otros cometas. Otras misiones de interés de la NASA son la New Horizons y la Dawn, enviadas al cinturón de Kuiper y al cinturón de asteroides, respectivamente. La primera se lanzó en 2006 y casi una década después sobrevoló Plutón. La segunda fue lanzada en 2007 y en 2015 llegó al planeta enano Ceres, cuya superficie cartografió con gran detalle.

¿Viajaremos a Marte?

Marte merece un tratamiento especial, ya que probablemente será el segundo planeta, tras la Tierra, en ser visitado por el ser

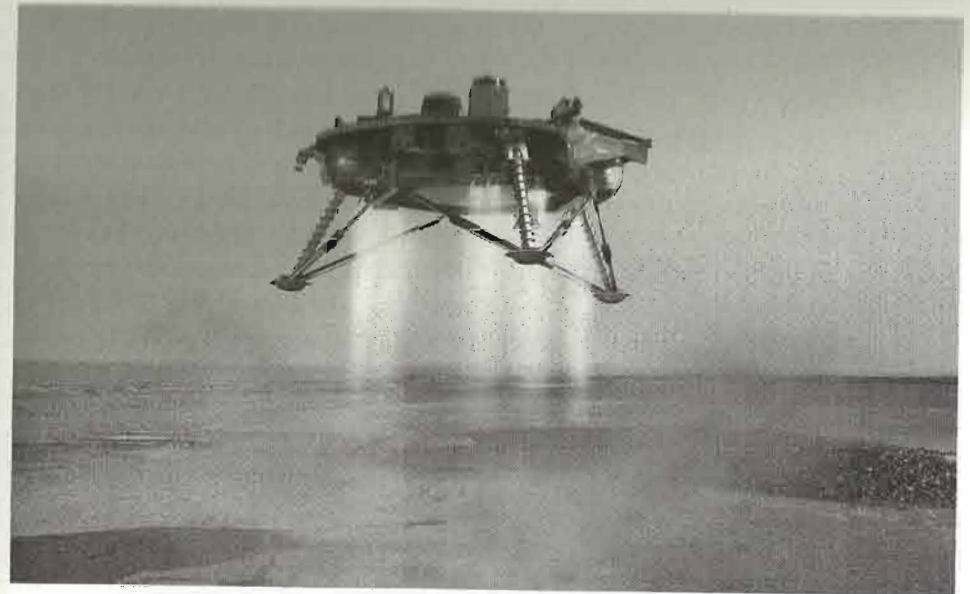
FIG. 2



humano. Aunque Venus está más cerca, las condiciones de Marte lo hacen mucho más accesible para las misiones tripuladas a su superficie. En la década de 1990 se volvió a activar con fuerza la exploración de este planeta. En 1996 la NASA envió la nave Mars Global Surveyor, que se puso en órbita marciana al año siguiente, recopilando y transmitiendo gran cantidad de datos hasta 2006, cuando se perdió el contacto. Hoy cuenta con la Mars Odyssey orbitando desde 2001, la Mars Reconnaissance Orbiter, desde 2006, y la MAVEN, desde 2014. Por su parte, la ESA envió en 2003 su misión Mars Express, la primera misión interplanetaria de esta agencia. Constaba de la nave orbital Mars Express Orbiter y la sonda de superficie Beagle 2, que no aterrizó con éxito. Aparte de realizar cartografías detalladas, estas naves están buscando indicios de agua y estudiando la atmósfera.

En cuanto a las sondas de superficie, solamente la NASA las ha enviado con éxito en las últimas décadas. La primera fue la Mars Pathfinder, un vehículo robotizado que aterrizó en 1997. Le siguieron la Spirit y la Opportunity, también vehículos robotizados, que aterrizaron en dos zonas diametralmente opuestas en 2004 y uno de los cuales, Opportunity, sigue operativo. En 2008, la sonda Phoenix aterrizó cerca del polo norte, equipada con un brazo robótico para hacer prospecciones a distintas profundidades. En 2012 aterrizó la Mars Science Laboratory, también conocida como Curiosity. Se trata de un vehículo robotizado tres veces más masivo que los del año 2004, equipado con instrumentos científicos más avanzados. Las sondas de superficie son fundamentales para realizar estudios geológicos y para buscar indicios de vida. La visión que nos dejan más de cuarenta años de misiones no tripuladas a nuestro planeta vecino es la de un pasado con abundante agua en superficie y una atmósfera más importante, existiendo la posibilidad de que haya habido algún tipo de vida.

En cuanto a las posibles misiones tripuladas, varias agencias espaciales han desarrollado propuestas, aunque de momento no existe un proyecto internacional común. La ESA tiene el programa Aurora, en cuyo marco hay previstas misiones no tripuladas a Marte en colaboración con otras agencias, como la NASA o la JAXA. También se contemplan posibles misiones tripuladas,



Momentos marcianos. Arriba, imagen artística de la sonda Phoenix en el momento de aterrizar en la superficie del planeta. El autorretrato del vehículo explorador Curiosity (abajo) es en realidad un montaje realizado a partir de múltiples imágenes tomadas con su brazo robótico.

MISIÓN TRIPULADA A MARTE

Las primeras propuestas afinadas para un viaje tripulado a Marte se realizaron tras las misiones Apolo. Consistían en una misión con una tripulación reducida que llevaría consigo un cohete para permitir el despegue desde el planeta. Las distintas etapas del cohete se enviarían al espacio y se ensamblarían allí. La tripulación pasaría unos meses en Marte, esperando las posiciones planetarias óptimas para el retorno. Uno de los problemas principales de estas propuestas era su elevadísimo coste en relación con los posibles beneficios.

Ajustando el presupuesto

Actualmente, existen propuestas económicamente más adecuadas para realizar la misión con las tecnologías disponibles. Esta constaría de dos naves (figura 1). Inicialmente, se enviaría una nave no tripulada para trasladar el vehículo de retorno. De esta forma, se conseguiría reducir drásticamente la masa de la nave, dotándola de capacidad para generar el combustible de retorno a partir del dióxido de carbono de la atmósfera marciana. El viaje inicial tardaría unos meses y la generación de combustible, otros diez. Alrededor de dos años después del lanzamiento de la primera nave, se enviaría una segunda con el módulo habitable y cuatro astronautas. No se enviaría hasta que la primera hubiera completado la generación del com-

bustible. Durante el viaje, de seis meses, se generaría gravedad artificial (figura 2) haciendo girar conjuntamente la nave y la última etapa agotada del cohete de despegue en torno al centro de gravedad común. Esta etapa se desprendería antes de ponerse en órbita marciana. La nave aterrizaría cerca del vehículo de retorno.

Un entorno desapaible

La tripulación permanecería dieciocho meses en Marte. La energía necesaria para mantener las condiciones de vida en el módulo habitable se mantendrían con el excedente de combustible generado por el vehículo de retorno. Aparte de realizar las misiones científicas encomendadas, los astronautas tendrían una importante carga de trabajos de mantenimiento, ya que estarían totalmente aislados. Además, tendrían que hacer frente a condiciones adversas, como la baja luminosidad y gravedad. La tenue atmósfera también podría suponer un problema por la exposición a la radiación solar y a los micrometeoritos. Cuando abandonasen el planeta con el vehículo de retorno, quedaría el módulo habitable para misiones posteriores. Habría que enviar naves con frecuencia suficiente para asegurar que en todo momento hubiera al menos dos vehículos de retorno. En caso de no poder usar uno de ellos por algún motivo, la tripulación podría viajar en el otro.

FIG. 1

Posibles módulos de retorno (izquierda) y habitable (derecha) de una misión tripulada a Marte.

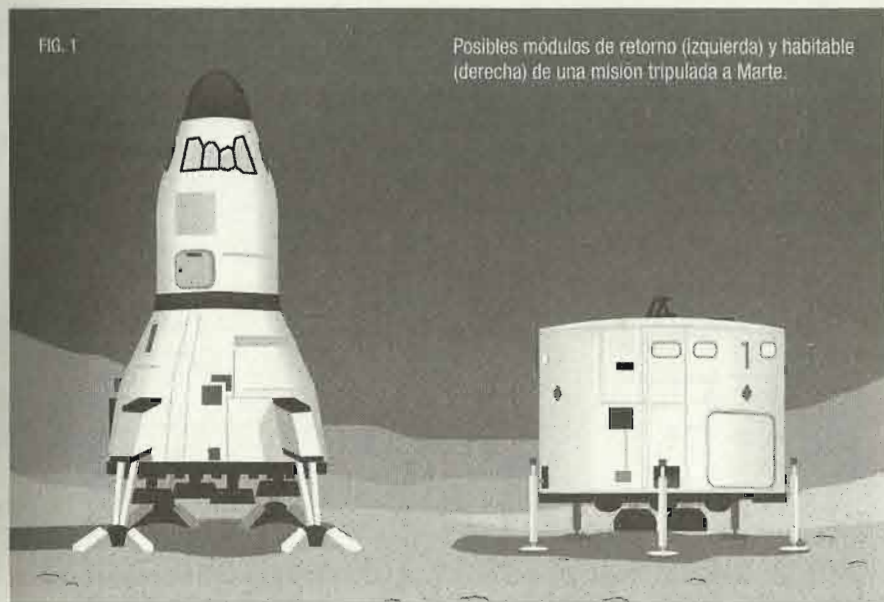
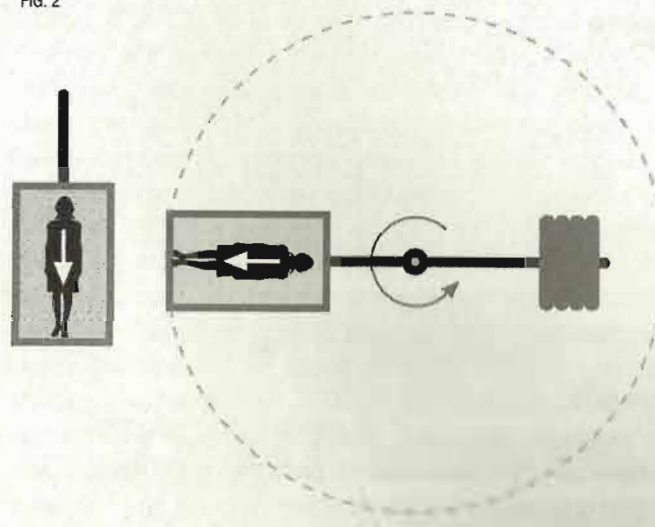


FIG. 2



El esquema muestra cómo generar gravedad artificial. A la izquierda, una caja con una persona dentro del campo gravitatorio terrestre. A la derecha, un sistema formado por una caja con una persona dentro y un contrapeso girando alrededor de su centro de masas en ausencia de gravedad. La inercia de la persona dentro de la caja de la derecha actúa empujándola hacia el exterior de forma similar a como el peso de la persona en la caja de la izquierda la empuja hacia abajo.

aunque los principales países contribuyentes han cuestionado esta parte del programa. Por su parte, Rusia está trabajando en una estación orbital tripulada en Marte, para evitar así el problema de tener que llevar el combustible para el despegue desde la superficie marciana. Esta estación serviría para controlar varias naves orbitales y sondas de superficie. Al ser controladas desde el propio planeta, se mejoraría la interacción, ya que se eliminarían los 14 minutos que tardan en llegar las comunicaciones desde la Tierra. Las muestras recopiladas se enviarían a la estación antes de volver. La duración del viaje se estima en dos años y medio. Esto supone un gran desafío, pero los rusos tienen mucha experiencia en estaciones orbitales. No hay que olvidar que tuvieron la Mir durante más de una década y tienen grandes responsabilidades en el mantenimiento de la ISS. En estas estaciones se han probado muchas tecnologías y se ha ganado mucha experiencia, por ejemplo en los paseos espaciales para realizar reparaciones. También han ayudado a comprender cómo se comporta el cuerpo humano durante largos periodos de ingravidez.

Hoy en día, el proyecto que tiene más posibilidades de llevar seres humanos a la superficie marciana es el de la NASA. Aparte de ser la única agencia que ya ha enviado personas a la Luna, es la que ha colocado más sondas en la superficie marciana. Además, ha anunciado que está desarrollando la tecnología necesaria para hacer el viaje en las próximas décadas. Actualmente está realizando pruebas con cápsulas Orion para cuatro personas, que serán un componente clave para las misiones a Marte. Anteriormente conocidas como CEV, se utilizan en las misiones a la ISS desde la retirada de los transbordadores en 2011. Como paso intermedio, se plantea recoger un gran pedazo de un asteroide cercano a la Tierra y ponerlo en órbita lunar. Se enviarán allí varias misiones tripuladas en la década de 2020, para estudiarlo y ganar experiencia en viajes tripulados. Mientras tanto, se seguirán enviando misiones no tripuladas a Marte para recopilar datos y probar tecnologías que hagan posible la supervivencia en el planeta. Si bien la NASA parece la agencia mejor posicionada para enviar una misión tripulada a Marte, es posible que finalmente se acaben uniendo esfuerzos, como ya ha ocurrido con la ISS.

- ANGUITA, F. Y CASTILLA, G., *Planetas*, Madrid, Editorial Rueda, 2010.
- BACHILLER, R., *Astronomía. De Galileo a la exploración espacial*, Barcelona, Lunwerg Editores, 2009.
- CASADO, J., *Houston, tenemos un problema. La historia de la exploración espacial a través de sus accidentes*, Madrid, El Rompecabezas, 2005.
- CORFIELD, R., *La vida de los planetas. Una historia natural del Sistema Solar*, Barcelona, Paidós Ibérica, 2009.
- HAZEN, R.M., *La historia de la Tierra. Los primeros 4500 millones de años del polvo estelar al planeta viviente*, Barcelona, Océano, 2014.
- SAGAN, C., *Cosmos*, Barcelona, Planeta, 2004.
- SOBEL, D., *Los planetas*, Barcelona, Anagrama, 2006.
- TAYLOR, S.R., *Nuestro Sistema Solar y su lugar en el cosmos*, Madrid, Ediciones Akal, 2003.
- TRIGO, J.M., *El origen del Sistema Solar*, Madrid, Universidad Complutense, 2001.
- VV.AA., *Exploración espacial*, Barcelona, Editorial Sol 90, 2006.

- acreción 38, 40, 42
 ALMA (*Atacama Large Millimeter/
 submillimeter Array*) 145, 147
 Almagesto 17
 Apolo, programa espacial 147, 149-151
 Armstrong, Neil 150, 151
 Aurora, programa espacial 158
 auroras 51, 80, 92, 109, 116, 127, 131

 Big Bang 31
 bombardeo intenso tardío 43, 64
 Bouvard, Alexis 28
 Brahe, Tycho 22
 Bruno, Giordano 30

 Calisto 105, 106, 110, 119
 campo magnético 9, 42, 51, 52, 64,
 66, 71, 73, 80, 81, 92, 101, 107, 109,
 110, 114, 116, 126, 127, 131, 146,
 155
 Caronte 84, 132, 133
 Cassini
 misión espacial 142
 nave espacial 113-117, 120, 121, 142,
 155, 156
 Cassini, Giovanni 25, 26

 Cavendish, Henry 25, 28
 balanza de 28, 29
 Ceres 9, 93, 132, 157
 Chandra, telescopio 143
 cinturón
 de asteroides 9, 44, 93-95, 107, 108,
 132 134, 141, 157
 de Kuiper 10, 44, 99, 132, 134, 136, 157
 de Van Allen 81
 cometa 8, 28, 51, 66, 67, 135, 136, 156,
 157
 complejo de Tharsis 88
 Compton, telescopio 143
 Cosmos, programa espacial 148
 Couch Adams, John 28
 criovulcanismo 110, 111, 119, 122, 123,
 130
 Cuenca Borealis 88
 cuerpos menores del sistema solar 10,
 38, 43, 44, 58, 86, 99, 132, 134, 137
 Curiosity, vehículo robotizado 158, 159

 Dawn, misión espacial 157
 Deep Impact, nave espacial 157
 Deimos 93
 disco disperso 10, 99, 134, 136

celipae 18, 20, 50, 82-84
 efecto Doppler 31, 48
 Encélado 9, 100, 114-119, 121
 ESA (Agencia Espacial Europea) 143, 155-158
 ESO (Organización Europea para la Observación Astronómica en el Hemisferio Austral) 147
 espectro electromagnético 36, 45, 48, 50, 51, 54, 55, 143
 Estación Espacial Internacional (ISS) 142, 148, 152, 162
 estrellas T Tauri 38, 39, 42
 Europa, satélite 9, 100, 105, 106, 109-111, 119

Fobos 86, 93
 fuerzas de marea 9, 58, 66, 67, 72, 84, 86, 106, 110, 114, 119, 120, 130

Gagarin, Yuri 148
 Galilei, Galileo 21, 22, 24, 25, 27, 30, 31, 50, 87, 105, 114, 142

Galileo
 misión espacial 111, 142, 155
 nave espacial 103, 104, 106, 109, 156

Ganímedes 105, 106, 110, 119
 Gemini, programa espacial 149
 Génesis, misión espacial 157
 Giotto, nave espacial 156
 Gran Mancha Roja 105, 128

Halley, Edmund 25, 31, 125
 cometa 135, 156
 Hayabusa, misión espacial 153
 heliosfera 46, 51, 99, 135, 136
 heliosismología 48
 Herschel, William 28
 Hertz, Heinrich Rudolph 68
 Hinode, observatorio 143
 hipótesis nebular 37, 42, 45
 Hubble, Edwin 31
 telescopio 37, 39, 143, 145
 huecos de Kirkwood 95
 Huygens
 misión espacial 142, 155
 sonda espacial 116, 156
 Huygens, Christiaan 114, 116

IA 105-107, 110
 ISAS (Instituto de Ciencia Aeronáutica y Espacial de Japón) 143

JAXA (Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial) 143, 156, 158

Júpiter 9, 10, 18, 24, 30, 32, 35, 40-44, 93-95, 99-103, 105-112, 116, 119, 124, 127, 128, 132, 134, 136, 141-144, 154-156

Kepler, Johannes 21, 22, 25, 37, 62, 87, 142
 leyes de 23, 24, 26, 27, 36
 observatorio 146

Le Verrier, Urbain 28
 límite de Roche 86, 114
 Luna 9, 10, 15, 17, 18, 20-22, 27, 42, 43, 62, 67, 81-87, 100, 109, 117, 119, 130, 142, 147-152, 162

Magallanes, nave espacial 153
 magnetosfera 51, 71, 80, 81, 105, 109, 110, 116, 127, 153, 155, 157
 manchas solares 50, 52

Mariner, programa espacial 152-154

Mars
 Express, misión espacial 158
 Global Surveyor, nave espacial 158
 Odyssey, nave espacial 158
 Pathfinder, vehículo robotizado 158
 programa espacial 153, 154
 Reconnaissance Orbiter, nave espacial 158

Marte 9-11, 18, 25, 26, 32, 38, 40, 41, 43, 61, 62, 81, 84, 86-94, 101, 111, 132, 142, 153, 154, 157, 158, 160-162

MAVEN, sonda espacial 158
 Maxwell, James Clerk 68, 142
 Maxwell Montes 70
 Mercurio 9, 10, 18, 24, 27, 38, 40, 44, 58, 61-66, 84, 101, 106, 119, 132, 142, 154
 Mercury, programa espacial 149
 Messenger, sonda espacial 64, 65, 154
 Minerva, sonda espacial 157
 Mir, estación espacial 148, 152, 162
 Monte Olimpo 88

NASA (Agencia Estadounidense del Espacio y la Aeronáutica) 143, 144, 146, 149, 153-157

NEAR Shoemaker, misión espacial 156
 Neptuno 8-11, 28, 40-43, 61, 62, 86, 99-101, 111, 124, 125, 127-132, 134, 136, 137, 142, 143, 155

New Horizons, misión espacial 157
 Newton, Isaac 7, 23, 25, 27, 28, 36, 37, 62, 142

nube
 de Oort 8, 10, 99, 134, 136
 molecular 37, 45, 100, 104, 125

Opportunity, vehículo robotizado 158

paralaje 25, 26, 55
 Philae, sonda espacial 157
 Phoenix, sonda espacial 90, 158, 159
 Pioneer, programa espacial 149, 154, 155

planeta enano 9, 30, 42, 93, 132, 157
 plutinos 132, 134
 Plutón 10, 30, 42, 84, 99, 131-134, 141, 157

Ptolomeo, Claudio 16-19, 21, 22
 puntos de Lagrange 108

radar 25, 66, 68-70, 90, 120, 121, 153
 radiación

de fondo de microondas 31
 electromagnética 8, 9, 31, 35, 46, 47, 54, 68, 116, 142

resonancia orbital 70, 11, 117, 131
 Richer, Jean 25, 26
 Rosetta, nave espacial 157

Salyut, estación espacial 148, 149
 Saturno 9, 10, 18, 22, 32, 40-43, 68, 99, 100, 101, 109, 111-117, 119, 120, 124, 126, 127, 134, 141-143, 155, 156
 SDO (*Solar Dynamics Observatory*) 52, 146

Shuttle-Mir, programa espacial 152
 Skylab, estación espacial 149
 SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) 48, 144
 Soyuz, naves espaciales 148, 149

Spirit, vehículo robotizado 158
 Spitzer, telescopio 143
 Sputnik, satélites 141, 148, 149
 Stardust, misión espacial 157
 Stereo, naves espaciales 144, 146

tacoclina 49

teoría
 de la relatividad 27, 35, 62
 del gran impacto 84, 85

Tierra 7-10, 15-22, 24-28, 31, 32, 35, 36, 38-40, 42-46, 48, 50, 51, 54, 56, 58, 61, 62, 64, 66, 67, 70-74, 76-84, 86-88, 91, 92, 94, 99, 101, 105, 110-112, 116, 120, 122-126, 135, 137, 142-144, 146, 148-153, 155-157, 162
 Titán 9, 68, 100, 115, 116, 119-123, 130, 156

tormenta solar 51, 52
 Tritón 86, 129, 130
 troyano 81, 93, 94, 107, 108, 116, 146

Ulysses, misión espacial 143
 Urano 9, 10, 28, 40-43, 61, 62, 67, 99, 100, 123-129

Valles Marineris 88, 89
 Vega, programa espacial 71, 153
 Venera, programa espacial 152, 153
 Venus 9, 10, 16, 18, 22, 24, 25, 38, 40, 58, 61, 62, 66-71, 84, 87, 112
 vida 9, 32, 35, 36, 46, 54, 58, 62, 76-78, 80, 91, 92, 100, 106, 110, 111, 119, 122, 123, 158
 viento solar 40, 42, 46, 51, 57, 66, 71, 80, 81, 92, 93, 109, 116, 135, 144, 157

Viking, programa espacial 154
 VLT (*Very Large Telescope*) 147
 Voyager, naves espaciales 148
 Vostok, naves espaciales 148
 Voyager, sondas espaciales 99, 125, 129, 130, 155

WFO (*Wide-Field Infrared Survey Explorer*) 146

Yohkoh, observatorio 143

El sistema solar

La reciente detección de indicios de un cuerpo varias veces más masivo que la Tierra más allá de la órbita de Neptuno ha causado revuelo en los medios de comunicación, que lo han bautizado como «el noveno planeta». Lo cierto es que la palabra planeta ha cambiado su significado a lo largo de la historia, y ha sido adjudicada y retirada a diversos cuerpos. En este momento, vale la pena hacer un inventario de todo lo que hemos aprendido hasta la fecha sobre el sistema solar. Más aún si tenemos en cuenta que el futuro inmediato se presenta muy apasionante, con una posible misión tripulada a Marte y otras no tripuladas en busca de vida en las lunas de Júpiter y Saturno.

Joel Gabàs Masip es arquitecto, máster en Informática y escritor de divulgación científica.